

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Vliv nesymetrie vzduchové mezery na technické parametry
asynchronního elektromotoru**

**Influence of Air Gap Unbalance on Technical Parameters of
Induction Electric Motor.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Janík**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Vliv nesymetrie vzduchové mezery na technické parametry
asynchronního elektromotoru.**
**Influence of Air Gap Unbalance on Technical Parameters of Induction
Electric Motor.**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Mechanické nesymetrie, vznik a projevy v ostatních veličinách stroje.
Příprava vzorků elektromotorů s definovanou nesymetrií.
Provedení měření elektrických a mechanických veličin.
Multikriteriální vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


Hrabovcová, V. a kol.: Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilinská univerzita, 2014
Petrov, G.N.: El. stroje 1 a 2, ACADEMIA 1980
Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: Teorie elektrických strojů, SNTL Praha, 1968
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and curves.

V Ostravě dne: *14. května 2020*

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Bernatovi Ph.D. a panu Ing. Janu Bajerovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá nesymetrií vzduchové mezery, zvláště jejími projevy na parametry asynchronního motoru. V úvodu práce je rozebráno magnetické pole ve vzduchové mezeře a dále teoretický předpoklad působení nesymetrie na parametry stroje jako jsou hluk a vibrace. V praktické části se práce věnuje praktickému měření parametrů stroje s nesymetrickou vzduchovou mezerou vůči referenčnímu stroji. Tyto stroje jsou porovnány a výsledkem je zjištění parametrů, na které má nesymetrie vzduchové mezery největší vliv.

Klíčová slova

Vzduchová mezera; nesymetrie vzduchové mezery; asynchronní motor; měření na asynchronním stroji; magnetické pole asynchronního motoru

Abstract

This work deals with the asymmetry of the air gap, especially its effects on the parameters of an asynchronous motor. In the introduction, the magnetic field in the air gap is analyzed and the theoretical assumption of the effect of asymmetry on the parameters of the machine such as noise and vibration. In the practical part, the work deals with the practical measurement of machine parameters with an asymmetric air gap to the reference machine. These machines are compared and the result is the determination of the parameters on which the asymmetry of the air gap has the greatest influence.

Key words

Air gap; air gap asymmetry; asynchronous motor; measurement on an asynchronous machine; magnetic field of an asynchronous motor

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
H	$A \cdot m^{-1}$	Intenzita magnetického pole
δ	mm	Velikost vzduchové mezery
μ	$H \cdot m^{-1}$	Permeabilita
B	H	Magnetická indukce
f	Hz	Frekvence
F	N	Síla
ω	$rad \cdot s^{-1}$	Úhlová rychlost
s	%	Skluz motoru
n	min^{-1}	Otáčky motoru
L	dB	Akustický tlak
a	$m \cdot s^{-2}$	Zrychlení
NDE strana motoru	-	Přední (nepoháněcí) strana motoru
DE strana motoru	-	Zadní (poháněcí) strana motoru

Seznam tabulek a obrázků

Seznam tabulek

TABULKA 5-1 TABULKA JMENOVITÝCH PARAMETRŮ STROJE	29
TABULKA 5-2 TABULKA PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAKRÁTKO	29
TABULKA 5-3 TABULKA POMĚRNÝCH PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ MOMENTU	30
TABULKA 5-4 PŘEHLED OTEPLENÍ REFERENČNÍCH BODŮ	36
TABULKA 5-5 ZMĚŘENÉ HODNOTY ODCHYLKY VIBRACÍ A RYCHLOSTI VIBRACÍ PRO PRUŽNÉ ULOŽENÍ	39
TABULKA 5-6 ZMĚŘENÉ HODNOTY ODCHYLKY VIBRACÍ A RYCHLOSTI VIBRACÍ PRO PRUŽNÉ ULOŽENÍ	40
TABULKA 5-7 ZMĚŘENÉ HODNOTY AKUSTICKÉHO TLAKU PŘI CHODU NAPRÁZDNO MOTORŮ	46
TABULKA 5-8 TABULKA ZMĚŘENÝCH HODNOT AKUSTICKÉHO TLAKU	48

Seznam obrázků

OBRÁZEK 2-1 MAGNETICKÝ OBVOD ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KLEČÍ NAKRÁTKO [1]	12
OBRÁZEK 2-2 ZNÁZORNĚNÍ VYOSENÍ ROTORU [3]	15
OBRÁZEK 3-1 PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ SIL PŮSOBÍCÍCH NA DEFORMACI STATOROVÉHO JHA [1]	19
OBRÁZEK 3-2 DRUHY NEVYVÁŽENOSTI [5]	25
OBRÁZEK 3-3 ZOBRAZENÍ A) NORMÁLNÍHO MOTORU B) EXCENTRICITY STATORU C) EXCENTRICITY ROTORU [6]	26
OBRÁZEK 4-1 UKÁZKA MĚŘENÍ MOTORU	27
OBRÁZEK 4-2 NÁČRT POLOHY ROTORU REFERENČNÍHO MOTORU	28
OBRÁZEK 4-3 NÁČRT ULOŽENÍ ROTORU U MOTORU S RADIÁLNÍ NESYMETRIÍ	28
OBRÁZEK 4-4 NÁČRT ULOŽENÍ ROTORU U MOTORU S AXIÁLNÍ NESYMETRIÍ	28
OBRÁZEK 5-1 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY STROJE PŘI JMENOVITÉM NAPĚTÍ	30
OBRÁZEK 5-2 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY PŘI JMENOVITÉM MOMENTU STROJE	31
OBRÁZEK 5-3 CHARAKTERISTIKY NAPRÁZDNO STROJE	32
OBRÁZEK 5-4 CHARAKTERISTIKY NAKRÁTKO	33
OBRÁZEK 5-5 PRŮBĚH OTEPLENÍ REFERENČNÍHO MOTORU	34
OBRÁZEK 5-6 PRŮBĚH OTEPLENÍ MOTORU S RADIÁLNÍ NESYMETRIÍ	35
OBRÁZEK 5-7 PRŮBĚH OTEPLENÍ MOTORU S AXIÁLNÍ NESYMETRIÍ	35
OBRÁZEK 5-8 AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM PROUDU NAPRÁZDNO REFERENČNÍHO MOTORU	37
OBRÁZEK 5-9 AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM PROUDU NAPRÁZDNO RADIÁLNĚ NESYMETRICKÉHO MOTORU	37
OBRÁZEK 5-10 AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM PROUDU NAPRÁZDNO AXIÁLNĚ NESYMETRICKÉHO MOTORU	38
OBRÁZEK 5-11 SCHÉMA VYHODNOCENÍ VIBRACÍ	39
OBRÁZEK 5-12 SLOUPCOVÝ GRAF ZMĚŘENÝCH VÝCHYLEK VIBRACÍ PRO PEVNÉ ULOŽENÍ STROJE PŘI CHODU NAPRÁZDNO	39
OBRÁZEK 5-13 SLOUPCOVÝ GRAF ZMĚŘENÉ RYCHLOSTI VIBRACÍ PRO PEVNÉ ULOŽENÍ STROJE PŘI CHODU NAPRÁZDNO	40
OBRÁZEK 5-14 SLOUPCOVÝ GRAF ZMĚŘENÝCH HODNOTEK VÝCHYLKY VIBRACÍ PRO PEVNÉ ULOŽENÍ MOTORU PRO CHOD PŘI JMENOVITÉM ZATÍŽENÍ	41
OBRÁZEK 5-15 SLOUPCOVÝ GRAF ZMĚŘENÝCH RYCHLOSTÍ VIBRACÍ PRO PRUŽNÉ ULOŽENÍ PRO CHOD PŘI JMENOVITÉM ZATÍŽENÍ STROJE	41
OBRÁZEK 5-16 PRŮBĚH VIBRACÍ REFERENČNÍHO MOTORU	42
OBRÁZEK 5-17 PRŮBĚH ZRYCHLENÍ VIBRACÍ MOTORU PO DOBU 2 OTÁČEK ROTORU	43

OBRÁZEK 5-18 PRŮBĚH ZRYCHLENÍ VIBRACÍ PRO MOTOR S AXIÁLNÍ NESYMETRIÍ PRO DOBU 2 OTÁČEK ROTORU	43
OBRÁZEK 5-19 AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM ZRYCHLENÍ VIBRACÍ REFERENČNÍHO MOTORU	44
OBRÁZEK 5-20 AMPLITUDOVÉ SPEKTRUM ZRYCHLENÍ VIBRACÍ MOTORU S RADIÁLNÍ NESYMETRIÍ	45
OBRÁZEK 5-21 AMPITUDOVÉ SPEKTRUM ZRYCHLENÍ VIBRACÍ MOTORU S AXIÁLNÍ NESYMETRIÍ	45
OBRÁZEK 5-22 ZMĚŘENÉ HODNOTY L_{WA} PŘI CHODU NAPRÁZDNO	47
OBRÁZEK 5-23 ZMĚŘENÉ HODNOTY L_{PFA} PŘI CHODU NAPRÁZDNO	47
OBRÁZEK 5-24 ZMĚŘENÉ HODNOTY L_{WA} PŘI JMENOVITÉM ZATÍŽENÍ STROJE	48
OBRÁZEK 5-25 ZMĚŘENÉ HODNOTY L_{PFA} PŘI JMENOVITÉM ZATÍŽENÍ STROJE	49

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam tabulek a obrázků	8
1 Úvod	11
2 Vzduchová mezera u asynchronního stroje	12
2.1 Magnetické pole ve vzduchové mezeře	12
2.2 Magnetické pole nesymetrické vzduchové mezery	14
3 Negativní projevy nesymetrie vzduchové mezery	17
3.1 Vliv proměnlivé vzduchové mezery na hluk	17
3.2 Projev nesymetrie v proudových spektrech	23
3.3 Projev nesymetrie ve spektru vibrací	24
4 Popis měřeného motoru	27
5 Vyhodnocení měření	29
5.1 Měření parametrů stroje	29
5.2 Měření zatěžovacích křivek stroje	30
5.3 Měření naprázdno	31
5.4 Měření nakrátko	32
5.5 Měření oteplovacích křivek	33
5.6 Vyhodnocení ze spekter proudu	36
5.7 Vyhodnocení vibrací	38
5.7.1 Měření odchylky a rychlosti u vibrací	39
5.7.2 Vyhodnocení zrychlení u vibrací	42
5.8 Měření hluku	46
6 Závěr	50
Seznam použité literatury	51

1 Úvod

Elektrické stroje dnes tvoří nedílnou součásti našich životů, ať už se jedná o generátory elektrické energie, tak samotné motory. Elektrické motory jsou součástí různých poháněcích zařízení, kompresorů, ventilátorů a automatizačních prostředků. Nejpoužívanějším typem je asynchronní motor, který má jednoduchou konstrukci s vysokou spolehlivostí.

Na každý motor jsou kladeny vysoké nároky na přesnost výroby a jejich životnost. Oba parametry spolu úzce souvisí, protože špatně vyrobený motor může způsobit větší namáhání konstrukčních částí a ty poté mohou být poruchové. Jedním z parametrů, který dokáže zapříčinit tyto problémy je nesymetrická vzduchová mezera. Pokud se jedná o vyosený rotor může to způsobit větší namáhání ložisek a to zapříčinit větší tření, tudíž větší tepelné namáhání.

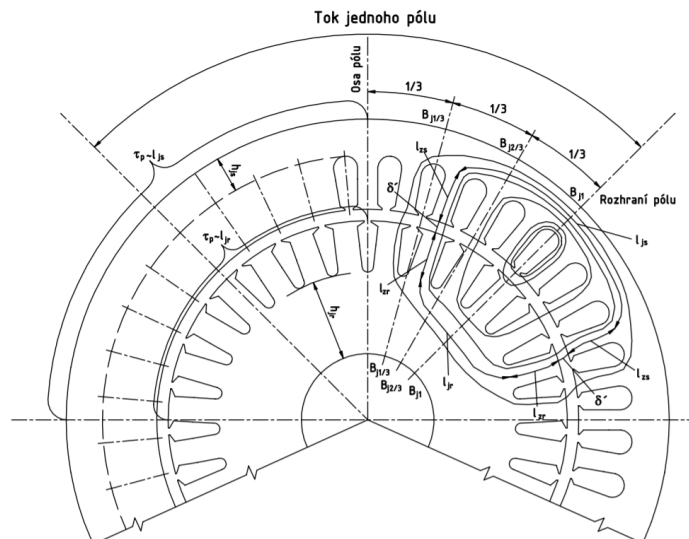
Tato diplomová práce se ve svém úvodu zabývá projevy nesymetrie vzduchové mezery. Na počátku popisuje magnetické pole v této vzduchové mezeře. Dále se zabývá jejími negativními projevy a to na hluk a vibrace. V dalším pokračování tato práce popisuje jak projevy nesymetrické mezery detekovat.

Praktická část diplomové práce se zabývá měřením účinků nesymetrie vzduchové mezery a porovnává je na dvou vzorcích s různou nesymetrií vůči referenčnímu motoru, který má vzduchovou mezeru symetrickou. Měření nesymetrické mezery bylo dvojí, v jednom se porovnávají dopady špatně vyrobeného štítu na jedné straně a v druhém měření se nesymetrie ještě prohlubuje a jsou štíty špatné oba. Změřené parametry jsou porovnány mezi sebou a zjišťuje se na který parametr má takto vyrobená nesymetrie největší vliv.

2 Vzduchová mezera u asynchronního stroje

Asynchronní stroj je nejjednodušší a nejlevnější točivý elektrický stroj. Mezi jeho výhody patří jednoduchost, ze které plyne i dobrá provozní spolehlivost. Rozsah výkonu se pohybuje od jednotek wattů až po stovky kilowattů. Asynchronní stroj se skládá ze dvou částí – statoru a rotoru.. Stator a rotor odděluje vzduchová mezera, ta může být tvořena vzduchem, ale např. u vodních čerpadel také olejem. Touto mezerou prochází magnetický tok stroje a je součástí magnetického obvodu stroje. Podle provedení vinutí rotoru dělíme asynchronní stroje na stroje s kotvou nakrátko a stroje s kotvou kroužkovou.

Na obrázku 2 – 1 můžeme pozorovat siločáry magnetického toku procházející magnetickým obvodem motoru. Tento magnetický tok, jak můžeme vidět, vychází ze zubů statoru a přes vzduchovou mezeru se dostane do rotorových zubů. Následně se magnetický tok obrátí rotorovým jhem a projde vzduchovou mezerou zpátky, aby se uzavřel přes zuby statoru a jeho jho. Je tedy patrné, že magnetický tok projde dvakrát přes vzduchovou mezeru. [1]



Obrázek 2-1 Magnetický obvod asynchronního motoru s kletví nakrátko [1]

2.1 Magnetické pole ve vzduchové mezeře

Při odvozování magnetického pole v obecně proměnné vzduchové mezeře budeme vycházet z obecného průtahu intenzity proudové vrstvy $A(\alpha, t)$ podél vrtání stroje. Za předpokladu radiálního průběhu sil ve vzduchové mezeře a nekonečně velké permeability železa můžeme napsat vztah pro intenzitu magnetického pole při obecném průběhu vzduchové mezery $\delta(x)$: [2]

$$H(\alpha) = \left[H_0 \delta_0 + \int_0^\alpha A(\alpha, t) d\alpha \right] \frac{1}{\delta(\alpha)} \quad (2.1.1)$$

Veličinou δ_0 označujeme vzduchovou mezeru v místě $\alpha = 0$. H_0 vychází z podmínky, že celkový magnetický tok je nulový. Tuto podmínku lze vyjádřit vztahem:

$$\mu_0 \int_0^{2\pi} H(\alpha) d\alpha = 0 \quad (2.1.2)$$

Pro H_0 můžeme dosazením z rovnice 1.1 napsat:

$$H_0 = -\frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{\int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\delta(\alpha)} \int_0^\alpha A(\alpha, t) d\alpha}{\int_0^{2\pi} \frac{dx}{\delta(\alpha)}} \quad (2.1.3)$$

K výpočtu intenzity proudové vrstvy využijeme předpokladu, že obsahuje pouze točivé složky ve tvaru: [2]

$$A(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{v=\infty} A_v \sin(v\alpha \mp \omega t) \quad (2.1.4)$$

Nyní dostaneme rovnici

$$\int_0^\alpha A(\alpha, t) d\alpha = \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{A_v}{v} \cos(v\alpha \mp \omega t) + \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{A_v}{v} \cos \omega t \quad (2.1.5)$$

Pro vodivost vzduchové mezery s dobrým přiblížením platí princip superpozice. Z této úvahy nám stačí sledovat pouze jednu harmonickou složku. Pro magnetickou indukci B v místě α buzenou harmonickou řadou v platí vztah $B(\alpha, t) = \mu_0 H(\alpha)$. Dosadíme-li do vztahu rovnice, dostaneme po úpravě vztah:

$$B(\alpha, t) = \frac{\mu_0 \cdot \int_0^{2\pi} \frac{A_v}{v} \cdot \frac{\cos(v\alpha \mp \omega t)}{\delta(\alpha)} d\alpha}{\delta(x) \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\delta(\alpha)}} - \frac{\mu_0 \cdot \frac{A_v}{v} \cos(v\alpha \mp \omega t)}{\delta(\alpha)} \quad (2.1.6)$$

Tento výraz rozvedeme pomocí Fourierova rozvoje o základní periodě 2π , která odpovídá obvodu vrtání stroje. Touto aplikací dostaneme obecný vztah:

$$\frac{1}{\delta(\alpha)} = a_0 + \sum_{v=1}^{v=\infty} a_v \cos v\alpha + \sum_{v=1}^{v=\infty} b_v \cos v\alpha \quad (2.1.7)$$

Pro jednotlivé koeficienty poté platí

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\delta(\alpha)} \quad (2.1.8)$$

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos v\alpha}{\delta(\alpha)} d\alpha \quad (2.1.9)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin v\alpha}{\delta(\alpha)} d\alpha \quad (2.1.10)$$

První člen rovnice pro vodivost vzduchové mezeře můžeme tímto rozvojem upravit a vznikne nám rovnice

$$\begin{aligned} \frac{\mu_0 A_v}{v\delta(\alpha)} \cdot \frac{\cos \omega t \cdot \int_0^{2\pi} \frac{\cos v\alpha}{\delta(\alpha)} d\alpha \mp \sin \omega t \int_0^{2\pi} \frac{\sin v\alpha}{\delta(\alpha)} d\alpha}{\int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\delta(\alpha)}} \\ = \frac{\mu_0 A_v}{v\delta(\alpha)} \cdot \frac{a_v \cos \omega t \mp b_v \sin \omega t}{2a_0} \end{aligned} \quad (2.1.11)$$

Nyní dostaneme konečný výraz pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře [2]

$$B(\alpha, t) = -\frac{\mu_0}{\delta(\alpha)} \cdot \frac{A_v}{v} \left[\cos(v\alpha \mp \omega t) - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a_v}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{b_v}{a_0}\right)^2} \sin(\omega t + \varphi) \right] \quad (2.1.12)$$

kde $\varphi = \arctg \frac{b_v}{a_v}$

Pokud řád silně vyvinuté harmonické v rozvoji neodpovídá řádu v průběhu intenzity proudové vrstvy, platí

$$\sqrt{\left(\frac{a_v}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{b_v}{a_0}\right)^2} \ll 1 \quad (2.1.13)$$

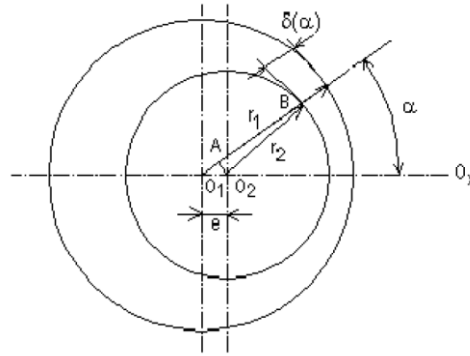
Tomuto případu pak odpovídá s dobrým přiblížením vztah [2]

$$B(\alpha, t) = \mu_0 \cdot \frac{A_v \cos(v\alpha \mp \omega t)}{v \delta(\alpha)} \quad (2.1.14)$$

2.2 Magnetické pole nesymetrické vzduchové mezeře

Nesymetrická vzduchová mezeře může vzniknout excentricky uloženým rotorem, nebo působením radiálních sil, které způsobí deformaci statorového jha. V této kapitole si rozebereme magnetické pole způsobené excentricky uloženým rotorem.

V předešlé úvaze byla vzduchová mezeře obecně mezi dvěma hladkými nebo drážkovanými soustřednými válci. Nyní budeme uvažovat případ pro excentricky uložený rotor, tedy vzduchovou mezeru mezi dvěma nesoustřednými válci.



Obrázek 2-2 Znázornění vyosení rotoru [3]

Průběh vzduchové mezery můžeme popsat rovnicí

$$\delta(\alpha) = r_2 + \varepsilon \cos \alpha - \sqrt{\varepsilon^2 \cos^2 \alpha + r_1^2 - \varepsilon^2} \quad (2.2.1)$$

Kde ε označuje velikost excentricity, tedy vzdálenost os obou válců

Z obrázku 1.1 můžeme vidět, že velikost excentricity je mnohem menší než průměr vnitřního válce (tedy rotoru), platí tedy $\sqrt{\varepsilon^2 \cos^2 \alpha + r_1^2 - \varepsilon^2} \cong r_1$ a pro průběh vzduchové mezery můžeme napsat vztah

$$\delta(\alpha) = \delta_0 + \varepsilon \cos \alpha \quad (2.2.2)$$

kde člen $\delta_0 = r_2 - r_1$

Odvozením vyjdeme z úvahy, že máme několikafázové vinutí o obecném počtu pólů, které vytváří magnetomotorickou sílu $F(\alpha, t) = F_v \cos(p\alpha - \omega t)$. Dosazením do rovnice dostaneme průběh magnetické indukce [2]

$$B(\alpha, t) = \mu_0 F_v \left\{ \frac{\cos(p\alpha - \omega t)}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a_v}{a_0}\right)^2 + \left(\frac{b_v}{a_0}\right)^2} \frac{\sin(p\alpha - \omega t)}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} \right\} \quad (2.2.3)$$

Magnetickou indukci můžeme opět popsat koeficienty Fourierovy řady a pro nejsilnější vyjádřenou harmonickou složku o řádu $v = 1$ dostaneme tyto koeficienty Fourierova rozvoje:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\alpha}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} = \frac{1}{\delta_0} \quad (2.2.4)$$

$$a_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} d\alpha = -\frac{\varepsilon}{\delta_0^2} \quad (2.2.5)$$

$$b_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \alpha}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} d\alpha = 0 \quad (2.2.6)$$

Pro dvoupólový stroj, kde je řád harmonické magnetomotorické síly i vodivosti stejný, platí vztah

$$B(\alpha, t) = \mu_0 F_1 \left[\frac{\cos(\alpha - \omega t)}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} - \frac{\varepsilon}{2\delta_0} \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} \right] \quad (2.2.7)$$

Jelikož $\frac{\varepsilon}{\delta_0} \ll 1$, můžeme s dobrým přiblížením druhý člen rovnice zanedbat. U vícepólových strojů můžeme koeficienty a_v a b_v zanedbat, neboť proti koeficientu a_0 nemají takový vliv. Obecně pro stroje s $p > 1$ můžeme zanedbat druhý člen rovnice a napsat

$$B(\alpha, t) = \mu_0 F_1 \frac{\cos(\alpha - \omega t)}{\delta_0 + \varepsilon \cos \alpha} = \frac{\mu_0 F_V}{\delta_0} \cos(p\alpha - \omega t) \left[1 - \frac{\varepsilon}{\delta_0} \cos \alpha + \left(\frac{\varepsilon}{\delta_0} \right)^2 \cos^2 \alpha + \dots \right] \quad (2.2.8)$$

Tuto mocninnou řadu můžeme nahradit goniometrickou funkcí řadou, která odpovídá násobkům úhlu α . Tím dostaneme vztah [2]

$$B(\alpha, t) = \frac{\mu_0 F_V}{\delta_0} \sum_{v=0}^{v=\infty} U_v \cos[(p \pm v) \alpha - \omega t] \quad (2.2.9)$$

Kde U_v znázorňuje rychle ubývající amplitudy příslušných harmonických složek

Z odvození můžeme vidět, že vlivem excentricity rotoru při budící magnetické síle o p pólpárech, se vyskytují všechna pole řádu $p \pm v$, kde v je z řádu celých čísel. Nejsilnější harmonické budou řádu $p \pm 1$

3 Negativní projevy nesymetrie vzduchové mezery

Nesymetrie vzduchové mezery má největší vliv na hluk a vibrace. Dalším parametrem, kde se projevuje je spektrum statorového proudu.

3.1 Vliv proměnlivé vzduchové mezery na hluk

Magnetické příčiny vzniku hluku

Obecně lze příčiny hluku rozdělit na příčiny magnetické a mechanické. Mechanickými příčinami mohou být např. ložiska, kde valivá jsou hlučnější než kluzná, dále ventilátor, kde úroveň hluku je určena ze součinu počtu lopatek a základní frekvence otáčení. Rozhodující úlohu jak u magnetických tak mechanických mají rezonanční vlivy, ať už dutých prostorů na principu Helmholtzova rezonátoru, nebo vlastními mechanickými kmity hlavních konstrukčních částí nebo stroje jako celku. [2]

Magnetickými příčinami hluku jsou časově a prostorově proměnlivé magnetické síly, které působí mezi jednotlivými částmi stroje. U asynchronních strojů jde o časově a prostorově proměnlivé radiální a magnetické síly mezi statorem a rotorem

Podle vědce Maxwella v každém místě vzduchové mezery působí radiální síla. Tuto sílu můžeme vyjádřit na jednotku plochy rovnicí:

$$p_r = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (3.1.1)$$

$B(\alpha, t)$ vyjadřuje okamžitou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře v místě vzdáleném o obvodový úhel α v čase t .

Při zanedbání vlivu železa, tedy $\mu_{Fe} = \infty$ můžeme do rovnice dosadit výraz $B(\alpha, t) = \mu_0 H(\alpha, t)$, a rovnice dostane tvar

$$p_r = \frac{\mu_0}{2} H^2(\alpha, t) \quad (3.1.2)$$

Obecně prostorové rozložení časově proměnlivé magnetické indukce má za následek časově proměnlivé síly mezi rotorem a statorem o určitém prostorovém rozložení. Tyto síly mohou za určitých podmínek rozechvít jednotlivé části stroje a tím způsobit hluk. U většiny strojů si můžeme rotor představit jako masivní válec, z toho je zřejmé, že rozhodujícím faktorem pro tvorbu hluku je chvění aktivního železa statoru, to si můžeme znázornit jako dutý válec, který je zevnitř namáhaný časově proměnlivými silami s určitým prostorovým uspořádáním.

Pro určení sil mezi statorem a rotorem, nyní musíme podle rovnice 2.1.2 určit časový a prostorový průběh okamžitých hodnot magnetické indukce ve vzduchové mezeře. To nám pomůže pro obecně platné rozložení sil, které působí radiálně mezi statorem a rotorem. Nyní budeme uvažovat obecný elektrický stroj, jehož magnetomotorická síla statoru F je prostorově a časově rozložena podle následující rovnice: [2]

$$F_s(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{v=\infty} F_v \cos(v\alpha \mp \omega_v t) \quad (3.1.3)$$

Rotorová magnetomotorická síla je podle rovnice:

$$F_r(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\mu=\infty} F_\mu \cos(\mu\alpha \mp \omega_\mu t + \varphi_\mu) \quad (3.1.4)$$

Řád harmonické magnetomotorické síly ve statoru je zde označen v a řád harmonické rotoru μ . Fázový posun φ_μ je úhel mezi vektory harmonických statoru a rotoru stejného řádu. V ose vinutí se nachází osa $\alpha = 0$.

Pro proměnlivou vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem, která je omezena libovolnými periodickými křivkami, můžeme napsat rovnici pro její vodivost:

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 + \sum_{\sigma=1}^{\sigma=\infty} \Lambda_\sigma \cos(\sigma\alpha + \varphi_\sigma) + \sum_{\varrho=1}^{\varrho=\infty} \Lambda_\varrho \cos[\varrho(\alpha - \omega_r t) + \varphi_\varrho] + \dots \quad (3.1.5)$$

Označením σ a ϱ znázorňujeme řády harmonických Fourierovy řady, které nahrazují průběh vzduchové mezery na straně statoru a rotoru, úhly φ_σ a φ_ϱ jsou fázové posuny těchto harmonických složek proti ose pólu, ω_r je úhlová rychlost rotoru.

Součtem magnetomotorických sil v daném místě a okamžiku násobeným magnetickou vodivostí vzduchové mezery v témž místě a okamžiku můžeme dostat okamžitou hodnotu magnetické indukce v daném místě. To můžeme zapsat rovnicí

$$B(\alpha, t) = [F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t)] \cdot \Lambda(\alpha, t) \quad (3.1.6)$$

Průběh radiální síly mezi statorem a rotorem na jednotku plochy (měrný tlak) v tomto případě bude

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} [F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t)]^2 \cdot \Lambda^2(\alpha, t) \quad (3.1.7)$$

Dosažením předešlých rovnic a po úpravě můžeme obecně napsat vztah ve tvaru

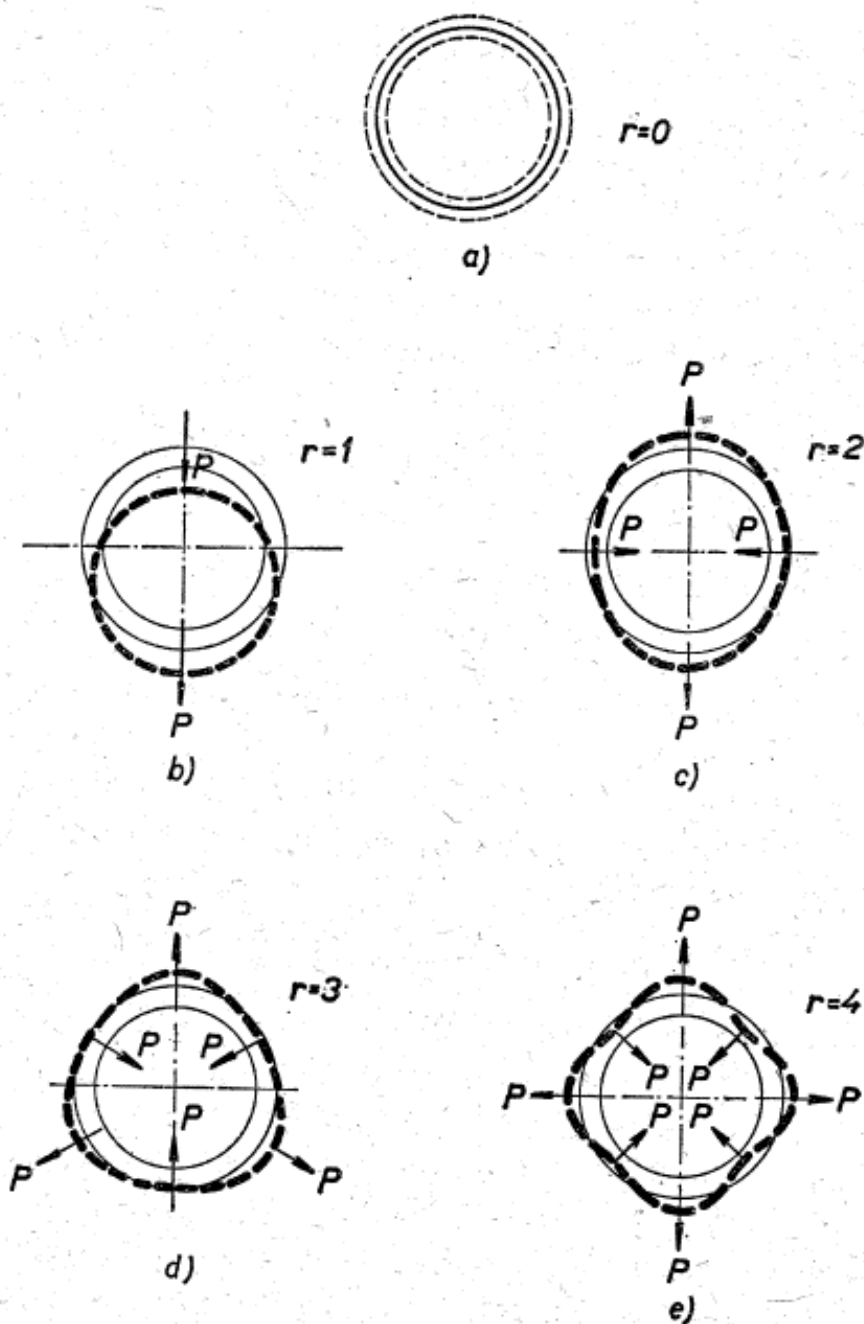
$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} \sum_{\xi=1}^{\xi=\infty} F_\xi \cos(\xi\alpha \mp \omega_\xi t + \varphi_\xi) \left[\Lambda_0^2 + \sum_{\zeta=1}^{\zeta=\infty} \Lambda_\zeta \cos(\zeta\alpha \mp \omega_\zeta t + \varphi_\zeta) \right] \quad (3.1.8)$$

Operátor ξ určuje řád libovolné harmonické magnetomotorické síly, který vznikl interferencí libovolných možných harmonických složek magnetomotorických sil statoru a rotoru a veličina ζ určuje řád libovolné harmonické vodivosti vzduchové mezery vzniklých kombinací libovolných harmonických periodické křivky omezující vzduchovou mezeru na straně statoru a rotoru.

Mezi statorem a rotorem tedy můžou vznikat radiální časové proměnlivé síly s různým počtem prostorových vln. Vznikají tedy postupné silové vlny. Tyto vlny můžeme zapsat obecným tvarem

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega_r t) \quad (3.1.9)$$

Velikost r leží v řádu celých čísel a Ω je kruhová frekvence síly řádu r . Z toho plyne, že tyto síly podél vrtání strojů obíhají úhlovou rychlostí $\frac{\Omega r}{r}$, v libovolném místě je kmitočet časovým změn tahu $f_r = \frac{\Omega r}{2\pi}$. Tyto síly mohou mít za následek rozechvění statoru, je-li počet pólů u těchto vln malý. Při vyšším počtu prostorových vln tyto síly působí na příliš krátkém rameni, tedy riziko rozechvění nenastává. Největší deformace statorového prstence dosahuje, když se frekvence f_r blíží vlastnímu mechanickému kmitočtu statoru.



Obrázek 3-1 Prostorové rozložení sil působících na deformaci statorového jha [1]

Při $r = 1$ platí vztah $p_r = A_1 \cos(r\alpha - \Omega_1 t)$, který představuje jednostranný tah působící na rotor. Ten obíhá rychlostí Ω_1 , při rezonanci vyvolá silné chvění stroje. Tato složka vznikne, když interferují 2 harmonické, u nichž se liší počet pólů o jedničku.

Při $r = 2, 3, 4$ vznikají průhyby statorového prstence. Rozložení sil při působení kmitů těchto řádů je názorně zobrazeno na obrázku 3 – 1. Složky sil nízkých řádů vznikají podle rovnice 2.1.9. Tyto složky jsou:

$$p'_r = P_\zeta \cos(\zeta\alpha - \omega_\zeta t + \varphi_\zeta) \quad (3.1.10)$$

$$p''_r = P_{\xi\zeta} \cos[(\zeta - \xi)\alpha - (\omega_\zeta - \omega_\xi)t + \varphi_\zeta - \varphi_\xi] \quad (3.1.11)$$

Podle těchto rovnic síly s malým počtem pólových prostorových vln vznikají, je-li

$$|\zeta| = r \quad (3.1.12)$$

$$|\zeta - \xi| = r \quad (3.1.13)$$

Tyto rovnice u bezhlučných strojů udávají obecné kritérium, které nemá být splněno. U asynchronních strojů jsou velmi malé vzduchové mezery, z tohoto důvodu jsou amplitudy harmonických magnetické vodivosti vzhledem k amplitudě nulové složky poměrně vysoké. Z tohoto důvodu jsou na hluk nejchoulostivější a proto při stanovení kritérií pro omezení hluku je třeba uvažovat vliv těchto harmonických. [2]

Vliv stupňových harmonických při konstantní vzduchové mezeře

Budeme uvažovat stroj se stálou vzduchovou mezerou o magnetické vodivosti $\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0$. Člen $\Lambda_\xi = 0$, z čehož plyne, že radiální síla mezi statorem a rotorem bude určena složkou p'_r , kde ζ určuje kombinace řádů harmonických magnetomotorických sil statoru a rotoru. Vznik síly nízkého řádu splňuje podle rovnice její třetí člen [2]

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0} \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} F_v F_\mu \cos[(v - \mu)\alpha \pm (\omega_v \pm \omega_\mu)t - \varphi_u] \quad (3.1.14)$$

Je-li $v - \mu = r$

Nejvýznamnějšími harmonickými magnetomotorické síly jsou tzv. stupňové harmonické řádu $v = Z_1 \pm p$ a $\mu = Z_2 \pm p$. Dosazením těchto řádů dostaneme kritéria, která u bezhlučných motorů nesmí být

$$|Z_1 - Z_2| = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1.15)$$

$$|Z_1 - Z_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \quad (3.1.16)$$

Podle rozboru v kapitole 2 vyplývá, že v místě α pulsuje pole každé statorové stupňové harmonické kruhovou frekvencí

$$\omega_v = \omega = 2\pi f \quad (3.1.17)$$

Rotorové stupňové harmonické kmitají kruhovou frekvencí

$$\omega_\mu = \omega \mp kZ_2\omega_r = 2\pi f \left[1 \mp k \frac{Z_2}{p} (1 - s) \right] \quad (3.1.18)$$

Kde k leží v oboru celých čísel

Dosazením předešlých rovnic do rovnice p_r určíme kruhovou frekvenci $\omega_\zeta = \omega_v \pm \omega_u$, kmitání radiální síly v místě a nebo její kmitočet $f_\zeta = \frac{\omega_\zeta}{2\pi}$

Úpravou dostaneme vztah pro kruhovou frekvenci

$$f_\zeta = f \left[k \frac{Z_2}{p} (1 - s) \pm 2 \right] \quad (3.1.19)$$

Tato rovnice udává kmitočty radiálních sil, které jsou vyvolány stupňovými harmonickými, z nichž stator můžou rozechvět pouze síly nízkého řádu, tj. při splnění podmínek pro $k=1$. Frekvence těchto sil jsou lineárně závislé na skluzu a mohou se tedy při určité rychlosti shodovat s frekvencemi vlastních kmitů statoru. V těchto případech jsou amplitudy kmitů a tedy intenzita hluku zesíleny rezonancí, a to podstatně. To se projevuje hlavně při rozběhu stroje. [2]

Vliv drážkování statoru a rotoru

Drážkové harmonické statoru a rotoru mají stejný počet pólů a stejnou rychlost jako příslušné stupňové harmonické, z čehož plyne, že drážkové harmonické nepřinášejí pro vznik hluku žádná nová kritéria

V průběhu magnetické indukce vzniknou 2 harmonické složky stejného řádu ($\zeta = \xi$), avšak mohou být různého kmitočtu, je-li řád některé harmonické složky magnetomotorické síly ζ stejný jako řád některé složky magnetické vodivosti ξ . Jejich interferencí vznikne složka tlaku, která je stejnosměrně rozdělená, avšak časově kmitá, to má za následek silný hluk. Vznikají tlaky nultého řádu.

Z toho plyne, že nemá-li hluk vznikat, nesmí se řád nejsilnějších složek magnetomotorické síly statoru a rotoru shodovat s řádem některé silně vyvinuté harmonické složky vodivosti vzduchové mezery.

Nejvýznamnějšími harmonickými magnetomotorické síly jsou tzv. stupňové harmonické řádu $v = Z_1 \pm p$ a $\mu = Z_2 \pm p$.

Hluk vzniká, platí-li

$$Z_1 \pm p = Z_2 \quad (3.1.20)$$

$$Z_2 \pm p = Z_1 \quad (3.1.21)$$

Tedy $Z_1 - Z_2 = p$

Působením drážkování rotoru na stupňovou harmonickou statoru nebo naopak vzniká tzv. diferenční pole. Časový a prostorový průběh síly, kterou toto diferenční pole způsobuje, dostaneme pomocí rovnice

$$p_r = \frac{\mu_0}{4} H_{\Delta}^2 \{1 - \cos 2[(\omega \mp Z_2 \omega_r)t + (Z_2 - Z_1 \mp p) \alpha]\} \quad (3.1.22)$$

H_o představuje intenzitu diferenčního pole. Nejnebezpečnější je síla nízkého řádu, platí-li

$$|Z_1 - Z_2| = p \pm 1 \quad (3.1.23)$$

Síly s malým počtem prostorových vln, které působí na hluk vzniknout za podmínky

$$|Z_1 - Z_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \quad (2.1.23)$$

Přitom vznikají kmity nultého, druhého, čtvrtého a dalších řádů. Pod úhlem alfa určíme v daném místě kmitočet síly [2]

$$f_{\zeta} = 2f \left[\frac{Z_2}{p} (1 - s) \pm 1 \right] \quad (3.1.24)$$

Vliv excentricity rotoru

Z odvození v kapitole 1.1 vyplývá, že vlivem excentricky uloženého rotoru vznikají ve vzduchové mezeře harmonická pole řádu $p \pm v$, kde v je z řádu celých čísel. Nejsilnější harmonické budou řádu $p \pm 1$. Tyto harmonické, které kmitají úhlovou rychlostí ω , samy o sobě hluk nezpůsobují, neboť kmitočet sil je nízký. Může se však při interferenci jiných harmonických vyskytnout výsledná harmonická stejného řádu o jiném kmitočtu, což způsobí kmity nultého řádu ($r = 0$). Uvažujme výsledné harmonické, které vzniknou interferencí stupňových harmonických. Podle minulé kapitoly nesmí platit: [2]

$$|(Z_1 \pm p) - (Z_2 \pm p)| = p \pm 1 \quad (3.1.25)$$

Musíme vzít v potaz kmity nultého řádu. Z tohoto ohledu je nutno pečlivě střídit a vyvažovat stroje, u nichž je

$$|Z_1 - Z_2| = 3p \pm 1 \quad (2) \quad (3.1.26)$$

$$|Z_1 - Z_2| = p \pm 1 \quad (3.1.27)$$

Při excentricitě vzduchové mezery výstředným naklínováním rotoru na hřídel se mění vodivost vzduchové mezery s úhlovou rychlostí ω_r . Rovnice pro rozměry vzduchové mezery je

$$\delta(\alpha, t) = \delta_0 + \varepsilon \cos(\alpha - \omega_r t) \quad (3.1.28)$$

Nyní provedeme stejný postup jako při odvozování v kapitole 2 a dostaneme výslednou indukci nejsilnější harmonické magnetické indukce ve tvaru

$$B(\alpha, t) = B \cos[(p \mp 1)\alpha - (\omega \pm \omega_r)t] \quad (3.1.29)$$

Při interferenci harmonické složky řádu $p \pm 1$ s pracovní harmonickou řádu p vzniknou jednostranné magnetické tahy ($r = 1$). To je dáno kruhovou frekvencí řádu $p \pm 1$ o hodnotě $\omega \pm \omega_r$, kdežto pracovní harmonická má kruhovou frekvenci ω . [2]

3.2 Projev nesymetrie v proudových spektrech

Pomocí frekvenční analýzy různých veličin, které motory generují za normálního provozu, můžeme poznat poruchy mechanických částí a nepravidelnosti magnetického a elektrického obvodu stroje. Je to jedna z metod funkční diagnostiky, která využívá satorový proud za chodu motoru. Tato metoda bývá doplněna i měřením vibrací pro zjištění elektrických závad stroje.

Proudová spektra mají dominantní první harmonickou síťové frekvence 50 Hz a její násobky. Výraznějších hodnot dosahují násobky liché, ty souvisejí s diskretním rozložením vinutí do drážek, vlivem drážkování může dojít ke změně vodivosti vzduchové mezery, dále se může projevit vliv nesinusového napájecího napětí. Symetrické trojfázové vinutí neobsahuje 3. harmonickou ani její násobky. Výskyt harmonických vyšších řádů může způsobit drážkováním satoru a rotoru.

Samotné měření se provádí pomocí analyzátorů. Na vstupu analyzátoru je přivedeno napětí z odporu, kterým prochází proud z proudových kleští, ty jsou připojeny na vstupní napájecí kabel stroje. Vyhodnocení probíhá v proudovém spektru amplitudy první harmonické složky s amplitudami ostatních harmonických složek. Pro vyhodnocení poruchy je důležitý rozdíl mezi amplitudou první harmonické s postranními pásmy amplitud jiných frekvencí. Pokud je tento rozdíl menší než 40 dB může se jednat o poruchu zařízení.

Při statické excentricitě je různá velikost vzduchové mezery, kdy dochází k silnější interakci satorového a rotorového magnetického pole v místě, kde je mezera menší. Vlivem toho vznikají postranní pásma v proudových spektrech, které jsou posunuty od síťové frekvence f_1 o synchronní otáčkovou frekvenci f . [4]

$$f_{STAT} = f_1 \pm f_{so} \quad (3.2.1)$$

$$f_{so} = \pm \frac{50}{p} = \pm \frac{f_1}{p} \quad (3.2.2)$$

Statická excentricita se také projevuje v pásmu dvojnásobku základní frekvence dle rovnice (3.1.3).

$$f_{STAT} = 2 \cdot f_1 \quad (3.2.3)$$

Při poruše rotoru může vzniknout dynamická excentricita. U tohoto případu je šířka vzduchové mezery nejen funkcí polohy jako u statické excentricity, ale i funkcí času, neboť proměnná vzduchová mezera se otáčí stejnou rychlostí jako otáčky rotoru. Vzniklá pásma jsou od základní frekvence posunuty o frekvenci rotoru.

$$f_{DYN} = f_1 \pm (1 - s) \cdot f_{so} \quad (3.2.4)$$

Frekvence, které dynamická excentricita vyvolala, jsou dány vztahem:

$$f_{exc} = \left[(n_{rt} \cdot R \pm n_d) \frac{1 - s}{p} n_{\omega s} \right] \quad (3.2.5)$$

Pro $n_d = 0$ platí, že se jedná o statickou excentricitu, když se $n_d = 1, 2, 3$ jedná se o excentricitu dynamickou, n_{rt} a $n_{\omega s}$ leží v oboru celých čísel. [4]

3.3 Projev nesymetrie ve spektru vibrací

Při vyhodnocení vibrací můžeme zkoumat jejich výchylku od ustálené polohy, rychlost vibrací a zrychlení vibrací. Vibrace podle zkoumaného druhu můžeme měřit snímačem výchylky, rychlosti nebo akcelerometrem určeným kde snímání zrychlení vibrací.

Snímač výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Principem snímače rychlosti je indukování napětí na koncích vodiče pohybujícího se v magnetickém poli. [5]

Schopnost buzení vibrací závisí na:

- Konstrukčních součástech strojů
- Tvaru součástí
- Kvalitě výroby součástí a jejich opotřebení
- Dynamických vlastnostech celé soustavy stroje

Zdroje vibrací můžeme z pohledu konstrukce rozdělit na zdroje systematické, které závisí na konstrukci, tedy jsou nezávislé na materiálu a kvalitou výroby součástí. Tlumení těchto vibrací dosáhneme pouze optimalizací konstrukce nebo za pomoci tlumících prvků. Druhými zdroji vibrací z hlediska konstrukce jsou zdroje závislé na kvalitě výroby, které jsou ovlivněny materiálem a kvalitou výroby.

Z pohledu dynamických vlastností dělíme zdroje vibrací na parametrické a neparametrické. Parametrické jsou ovlivněny periodickou změnou hmotnosti nebo tlumení. Zdroje neparametrické jsou zdroji, které pocházejí z vnějšího buzení.

V dalším bádání jsou uvedeny některé poruchy, které způsobí nesymetrii vzduchové mezery, které se poté objeví ve spektru vibrací. Důležitým pojmem je zde základní rotorová frekvence, ta je odvozena od otáček rotoru, tato frekvence je důležitá pro identifikaci poruch a nachází se v nízkofrekvenční oblasti spektra.

Samotná nesymetrie se odvozuje od frekvencí postranních pásem, které se rozprostírají kolem základní rotorové frekvence, nebo harmonické frekvence k základní frekvenci, jenž je celočíselným násobkem základní rotorové frekvence. Jejich velikost je také zásadní pro identifikaci nesymetrie. Frekvence na postranních pásmech jsou od základní frekvence vzdáleny konstantní vzdálenost jak na stranu k nižším frekvencím tak na stranu k frekvencím vyšším. Výskyt postranních pásem vyplývá z amplitudové modulace signálu neboli změny amplitudy v čase. Tyto změny nejčastěji souvisejí s frekvencí rotoru.

Dalším ukazatelem nesymetrie jsou subharmonické a interharmonické frekvence. Subharmonické jsou celočíselným podílem základní frekvence, interharmonické jsou podílem neceločíselným [5]

Nevyváženost rotoru

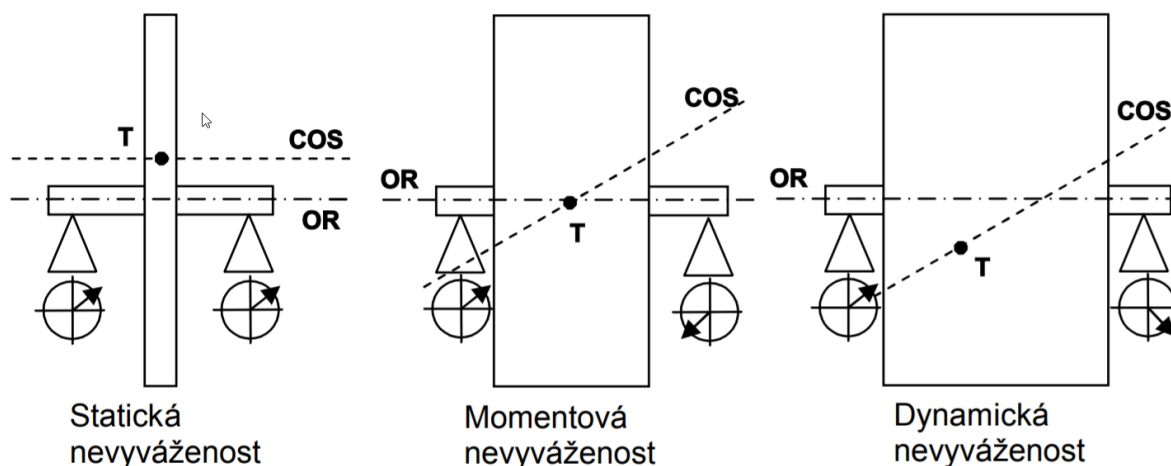
Nevyvážeností rotoru rozumíme stavu, kdy osa rotace rotoru není totožná s centrální osou setrvačnosti, která prochází těžištěm, v ní nabývá hmotností moment maximální hodnoty a derivační moment je nulový. Příčiny této poruchy můžou být různé, např.:

- Tvar rotující součásti a její nesymetrie
- Nehomogenita materiálu

- Odchylka tvaru při výrobě rotoru
- Opotřebení rotující součásti
- Znečištění nebo špatně usazená rotující část

Podle charakteru nevyváženosti rozlišujeme 3 typy nevyváženosti

- Statická
- Dynamická
- Momentová



Obrázek 3-2 Druhy nevyváženosti [5]

Z obrázku vidíme, že statická nevyváženost má osu otáčení rovnoběžnou s centrální osou otáčení. Tato nevyváženost se ve spektru vibrací projeví celočíselným násobkem základní rotorové frekvence. U základní rotorové frekvence bude výrazná amplituda na obou ložiscích, vzájemná fáze budou rovna 0, fázový posuv mezi horizontálním a vertikálním směrem bude roven 90° .

Momentová nevyváženost se projevuje různoběžnou osou otáčení vůči centrální ose otáčení. Obě tyto osy se protnou v těžišti. Tato nevyváženost se projeví celočíselnými násobky základní rotorové frekvence. Na obou ložiscích výrazná amplituda v radiálním směru, fáze obou amplitud budou od sebe vzájemně posunuty o 180° .

Dynamická nevyváženost je v praxi nejvyskytovanější poruchou. Osa otáčení je vychýlena od centrální osy otáčení, ale na rozdíl od momentové nevyváženosti se tyto osy neprotnou v těžišti. Tato nevyváženost se také projeví ve spektru vibrací s celočíselným násobkem základní rotorové frekvence. Dynamická nevyváženost se projeví ve spektru vibrací i na obou ložiscích, vzájemná fáze bude mít posuv v mezích $\pm 20^\circ$.

Obecně můžeme u všech nevyvážeností konstatovat, že amplituda zrychlení kvadraticky roste s otáčkami. Na základní rotorové frekvenci je amplituda a fáze vibrací stabilní. [5]

Excentricita statoru

V tomto stavu znamená, že osa statoru a rotoru není totožná. Osa rotoru je osou rotace i osa geometrická. Při této excentricitě se rotor otáčí mimo osu statoru. Šířka vzduchové mezery je závislá na prostoru ne na čase.

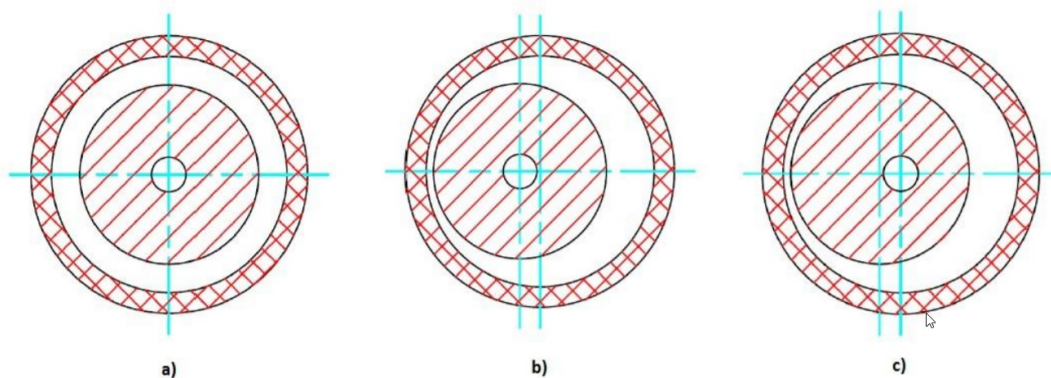
Tato porucha se ve spektru vibrací objeví na dvojnásobné frekvenci základní harmonické

Excentricita rotoru

Excentrický rotor znamená, že osa otáčení není osou souměrnosti. Tato porucha se projeví na frekvenci, která je násobkem základní rotorové frekvence [5]

$$f_p = P \cdot f_R \quad (3.2.3)$$

Kde P vyjadřuje počet satorových tyčí asynchronního motoru a f_R je základní frekvence rotorového pole.



Obrázek 3-3 Zobrazení a) normálního motoru b) excentricity statoru c) excentricity rotoru [6]

Z této kapitoly můžeme říct, že příčinami hluku v indukčních strojích jsou prostorově a časově proměnlivé magnetické síly působící mezi jednotlivými částmi stroje, konkrétně u asynchronního stroje se jedná o radiální magnetické síly mezi statorem a rotorem.

V proudových spektrech narážíme na problematiku nepravidelnosti magnetického a elektrického obvodu stroje. Tyto poruchy jsou identifikovatelné právě ve spektrech proudu. Na spektra vibrací má vliv nesymetrická vzduchová mezera způsobena mechanickými poruchami, které jsou popsány výše.

4 Popis měřeného motoru

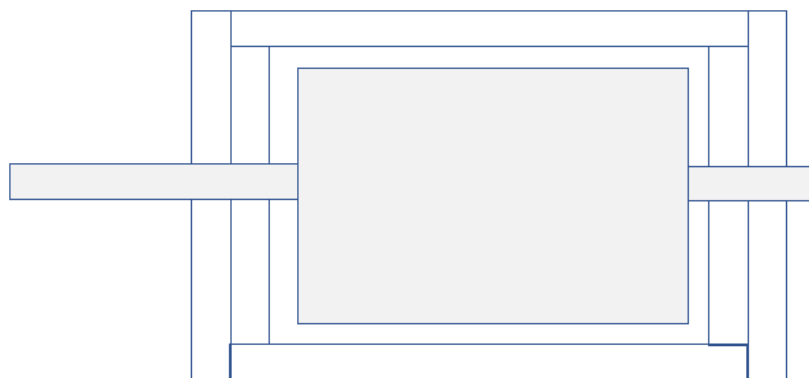
Měření probíhalo na dvoupólovém motoru SIEMENS řady 1LE5504-3AA73-4AB3 se jmenovitými parametry:

- Činný výkon $P = 315 \text{ kW}$
- Napájecí napětí $U = 400 \text{ V}$
- Proud $I = 540 \text{ A}$
- Jmenovité otáčky motoru $n = 2986 \text{ min}^{-1}$
- Účinník $\varphi = 0,87$



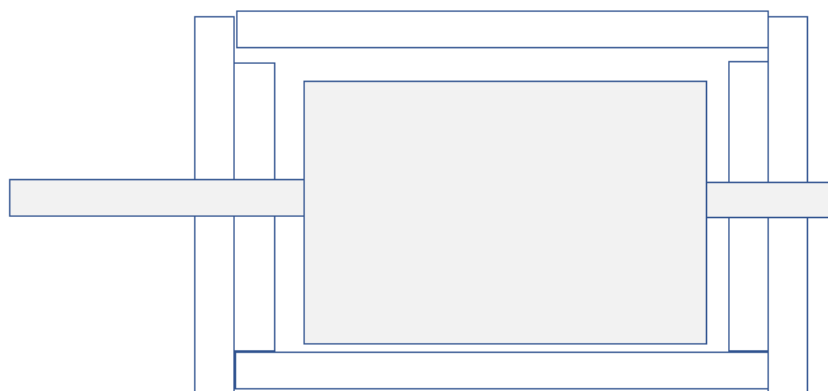
Obrázek 4-1 Ukázka měření motoru

Nesymetrie se dosáhlo výrobou štítů s menším průměrem osazení. Při měření tzv. Radiální nesymetrie se rotor vychýlil na jedné straně, aby se docílilo vyosení 0,5 mm na průměru. Při druhém měření se rotor stejně vyosil na obou stranách tak, že byl pokaždé vyosen na opačnou stranu, aby jeho uložení nebylo čistě horizontální, ale bylo zcela axiálně vyosené po celé délce statoru. V dalším bádání bude tato nesymetrie nazvána axiální. Pozorovat to můžeme na následujících obrázcích.



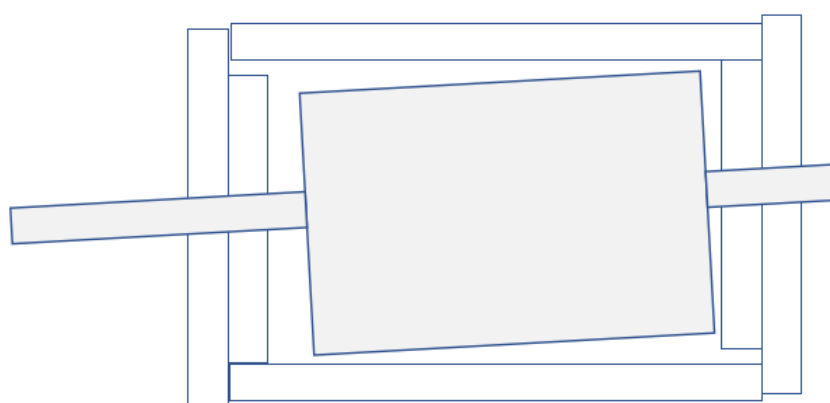
Obrázek 4-2 Náčrt polohy rotoru referenčního motoru

Uložení rotoru je standardní, průměr osazení štítů je 550 mm.



Obrázek 4-3 Náčrt uložení rotoru u motoru s radiální nesymetrií

Z obrázku 4 – 2 je patrné nedokonalé dolehnutí štítů na DE (zadní) i na NDE (přední) straně. Průměr osazení těchto štítů je 549,5 mm. Toto má za následek posunutí osy otáčení rotoru dolů.



Obrázek 4-4 Náčrt uložení rotoru u motoru s axiální nesymetrií

Na obrázku 1.7 vidíme, že každý štít je posunut na opačnou stranu, tím jsme dosáhli uložení s dynamickou excentricitou.

5 Vyhodnocení měření

Na motoru byla provedena standardní typová zkouška skládající se z:

- Měření jmenovitých parametrů stroje
- Měření naprázdno
- Měření nakrátko
- Měření jmenovitého oteplení stroje
- Měření hluku
- Měření vibrací

Ze změřených hodnot statorového proudu a zrychlení vibrací bylo pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) se provedla analýza jejich amplitudových spekter.

5.1 Měření parametrů stroje

Z tabulek při tomto měření porovnáváme parametry stroje při jmenovitém zatížení a změnu jejich hodnot při nesymetrické mezeře vůči referenčnímu motoru.

Tabulka 5-1 Tabulka jmenovitých parametrů stroje

		Referenční motor	Radiální nesymetrie	Axiální nesymetrie
Napájecí napětí	U (V)	400	400	399,9
Frekvence	f (Hz)	50	50	50
Výstupní výkon	P ₂ (kW)	315	315	315
Příkon	P ₁ (W)	325,577	325,576	325,847
Napájecí proud	I (A)	541,9	541,9	542,3
Účinník	cos φ (-)	0,867	0,867	0,867
Účinnost	η (%)	96,75	96,75	96,67
Otáčky	n (min ⁻¹)	2987	2987	2986,9
Skluz	s (%)	0,428	0,429	0,427
Moment	M (Nm)	1007,1	1007	1007,1

Z této tabulky můžeme vidět, že na jmenovité parametry mají minimální vliv. U měření Axiální nesymetrie pouze došlo k menšímu nárůstu příkonu stroje.

Tabulka 5-2 Tabulka parametrů z měření nakrátko

		Referenční motor	Radiální nesymetrie	Axiální nesymetrie
Poměrný záběrný moment	M _z (-)	3,79	3,9	3,55
Poměrný záběrný proud	I _z (-)	10,82	10,51	10,42

Z měření nakrátko je patrný vliv nesymetrie na záběrný proud, kde můžeme vidět jeho mírný pokles až o 4 desetiny.

Tabulka 5-3 Tabulka poměrných parametrů z měření momentu

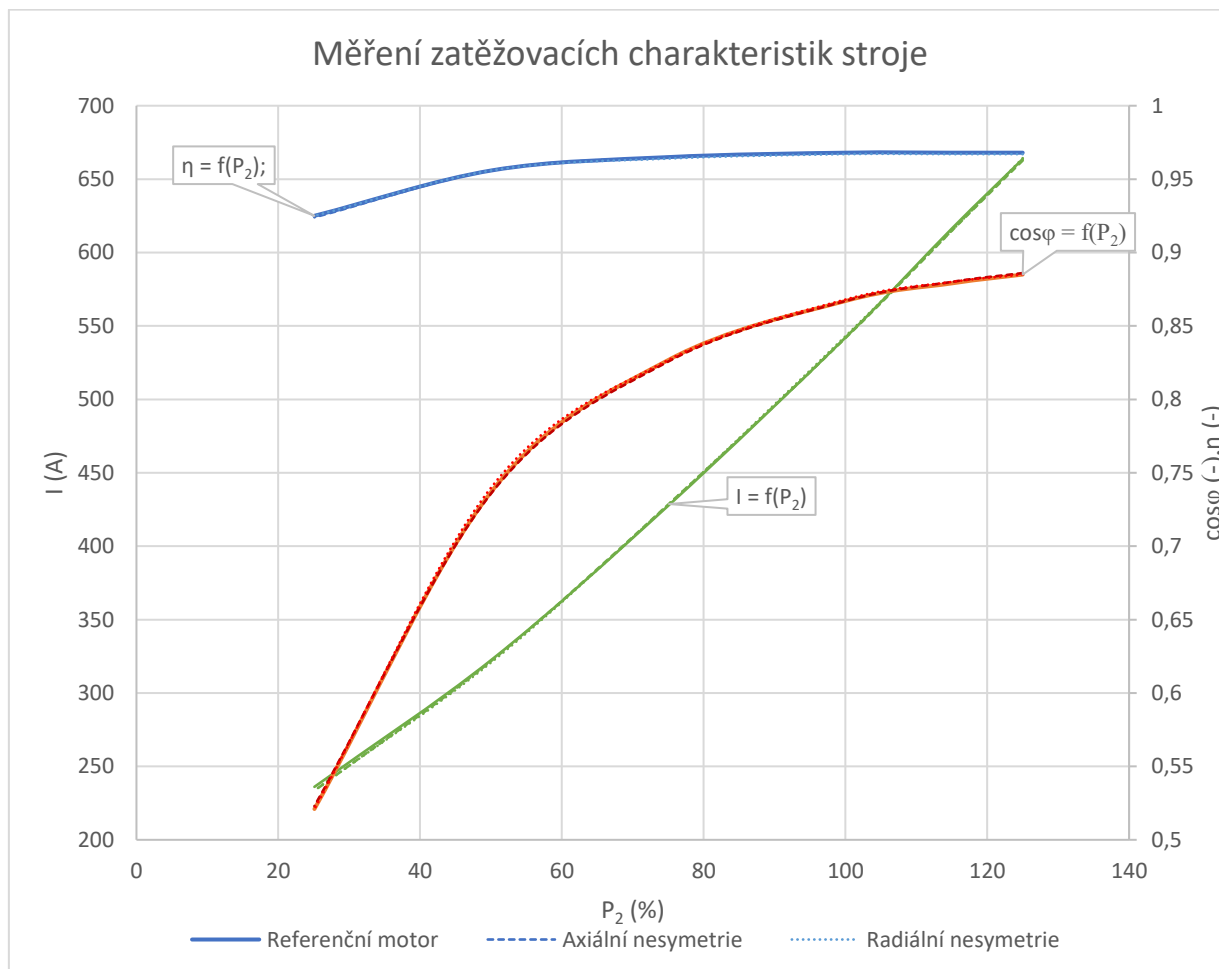
		Symetrická vzduchová mezera	Radiální nesymetrie	Axiální nesymetrie
Poměrný moment zvratu	$M_{zv} (-)$	2,93	2,96	2,89

Na moment zvratu nesymetrie žádný vliv nemá. Jeho hodnota kolísá v mezích, jejichž hodnota může být dána chybou měření.

5.2 Měření zatěžovacích křivek stroje

Měření při jmenovitém napětí

Při tomto měření zatěžovacích křivek nastavíme konstantní napájecí napětí. Abychom dostali zatěžovací charakteristiky, nastavujeme postupně zatížení od 20 % do 120 % výstupního výkonu. Výsledkem tohoto měření jsou závislosti účinnosti, účiníku a proudu na zatížení stroje.

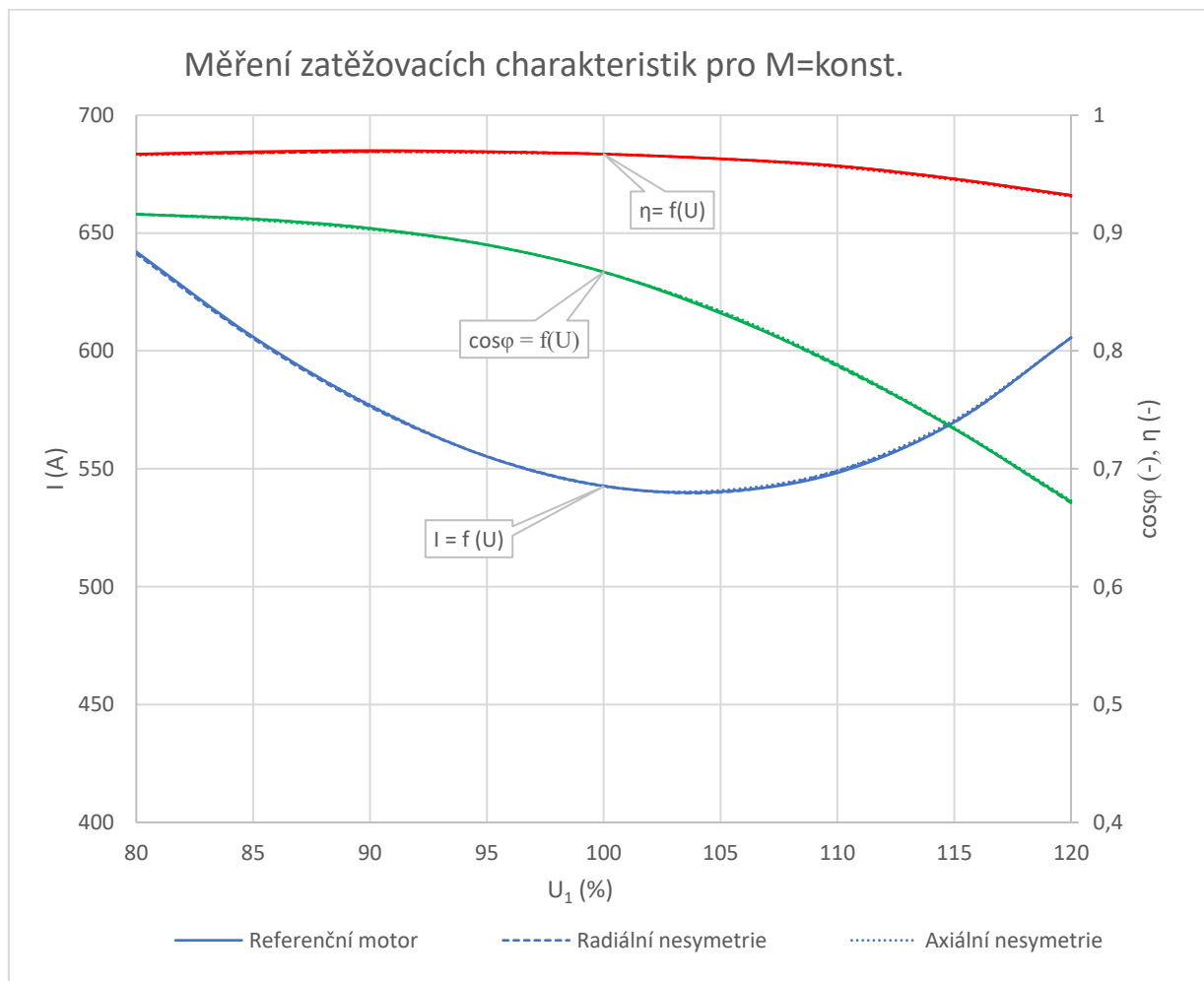


Obrázek 5-1 Zatěžovací charakteristiky stroje při jmenovitém napětí

Jak ze závislosti účinnosti, tak účinníku i proudu můžeme pozorovat, že na tyto parametry v závislosti na zatížení nemá vliv. Ze zatěžovacích charakteristik se tedy vliv nesymetrie vzduchové mezery neprokázal.

Měření při konstantním momentu

Při tomto měření zkoumáme vliv napájecího napětí na účinnost, účinník a proud při konstantním momentu. V tomto zkoumání jsme nastavili moment na hodnotu 1007 Nm, která odpovídá jmenovitému momentu stroje.

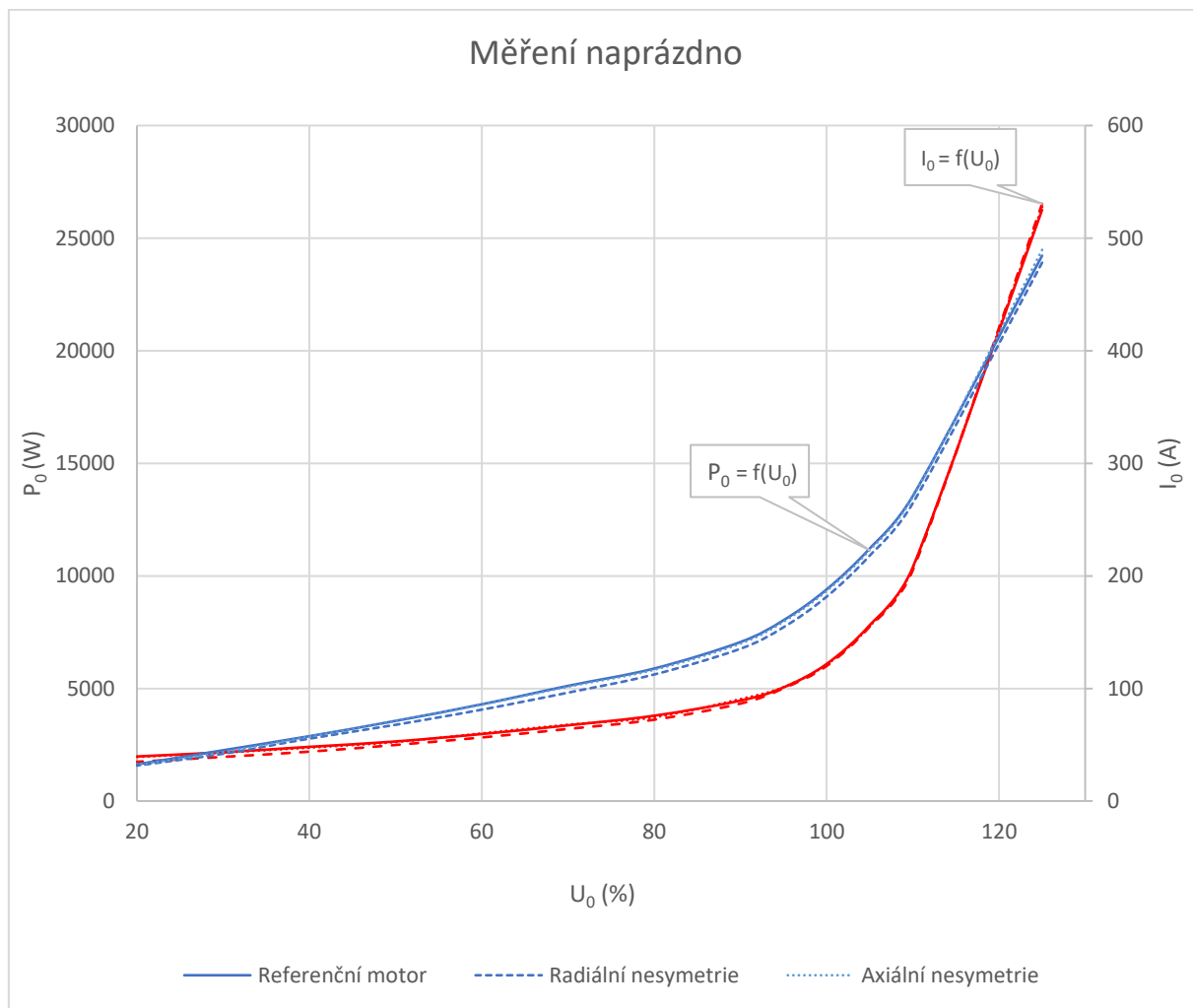


Obrázek 5-2 Zatěžovací charakteristiky při jmenovitém momentu stroje

V tomto měření se vliv nesymetrie na parametry neprokázal.

5.3 Měření naprázdno

Měření naprázdno nabízí pohled na chování stroje při nulovém zatížení. Měření probíhá při odlehčeném stroji. Zkoumanými veličinami je výkon a proud naprázdno v závislosti na procentním napětí naprázdno, které bylo zvyšováno z 20% hodnoty až do 120 % napájecího napětí.

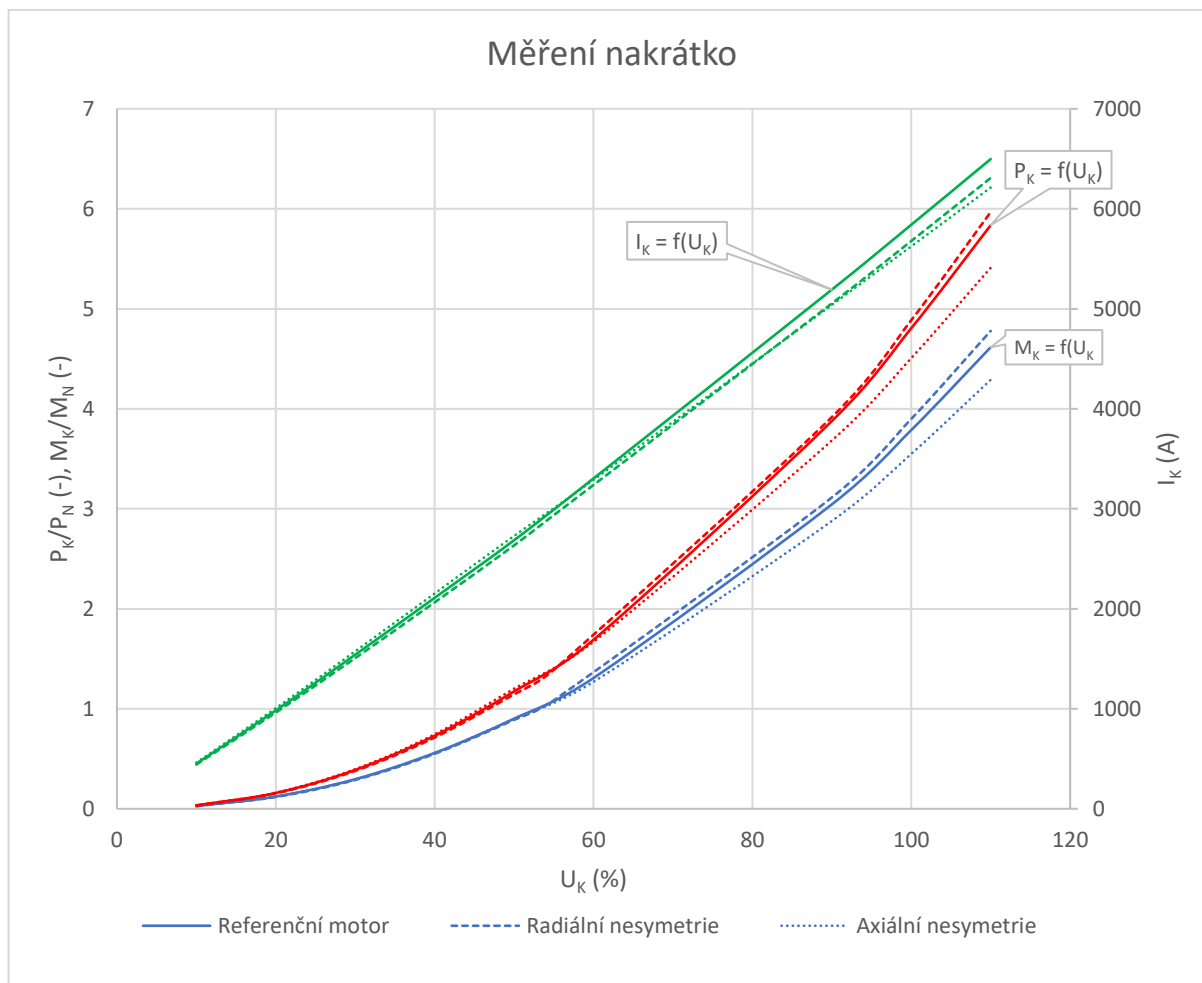


Obrázek 5-3 Charakteristiky naprázdno stroje

Z křivek naprázdno pozorujeme minimální vliv nesymetrické vzduchové mezery. U křivek pro motor s radiální nesymetrií je patrný mírný pokles. Tento pokles může být ovšem vysvětlen chybou měření, nikoliv jako prokazatelný vliv nesymetrické vzduchové mezery.

5.4 Měření nakrátko

Při měření nakrátko zkoumáme chování motoru ve stavu nakrátko. V tomto měření jsou předmětem proud nakrátko, moment a výkon nakrátko v závislosti na napájecím napětí. Měření probíhá od 10 % napájecího napětí vůči jmenovitému až po hodnotu 60 %. Dále měření neprobíhá, aby nedošlo k poškození stroje. Hodnoty vyšší než je tato jsou extrapolovány na změřený průběh.



Obrázek 5-4 Charakteristiky nakrátko

Ze křivek nakrátko můžeme pozorovat přímý vliv nesymetrie na hodnotu momentu nakrátko při jmenovitém zatížení. Při měření referenčního motoru dosáhla jeho hodnota 3814,5 Nm. Při měření radiální nesymetrie jeho hodnota vzrostla na 3926,14 Nm. Axiální nesymetrie, tedy nejhorší simulované podílnky, dosáhla poklesu momentu na 3574,3 Nm. Zde tedy můžeme hovořit o vlivu nesymetrie na moment.

Úplně stejný efekt můžeme pozorovat u charakteristik výkonu. Ostatní veličiny, jak můžeme ve vynesných grafech vidět, nejsou nesymetrií příliš ovlivněny.

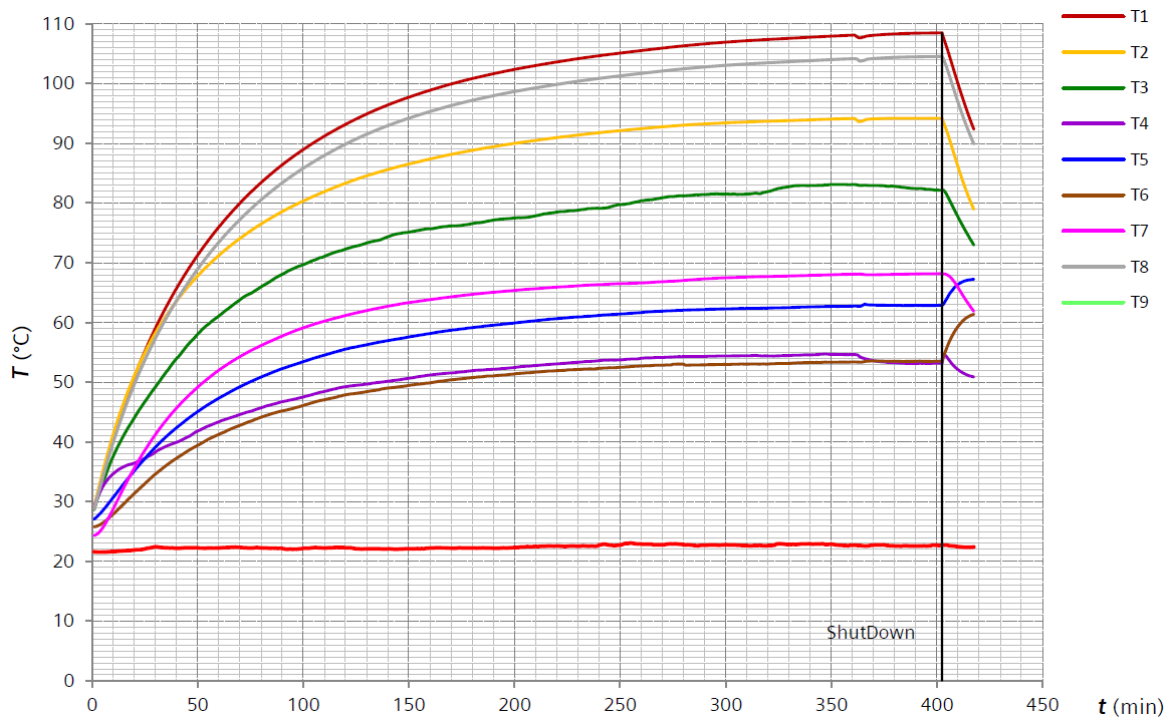
5.5 Měření oteplovacích křivek

V tomto měření zkoumáme oteplení na 9 různých částech stroje a to:

- začátek vinutí změřený senzorem TC-J
- konec vinutí
- ložiska na začátku vinutí
- kostra
- svorkovnice
- těsnící pouzdro na svorkovnici

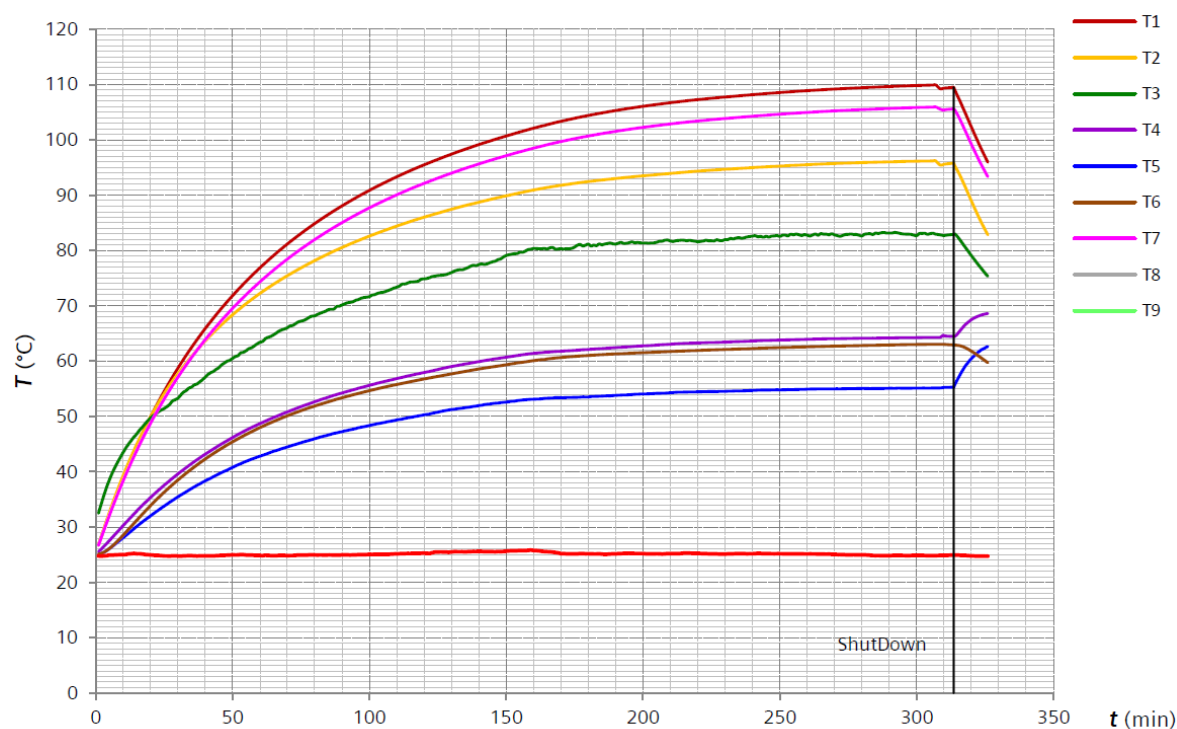
- ložiskový vnitřní kroužek na DE straně
- ložiskový vnitřní kroužek na NDE straně
- konec vinutí změřeným senzorem Pt1000

Měření probíhalo při teplotě okolí 24 °C.



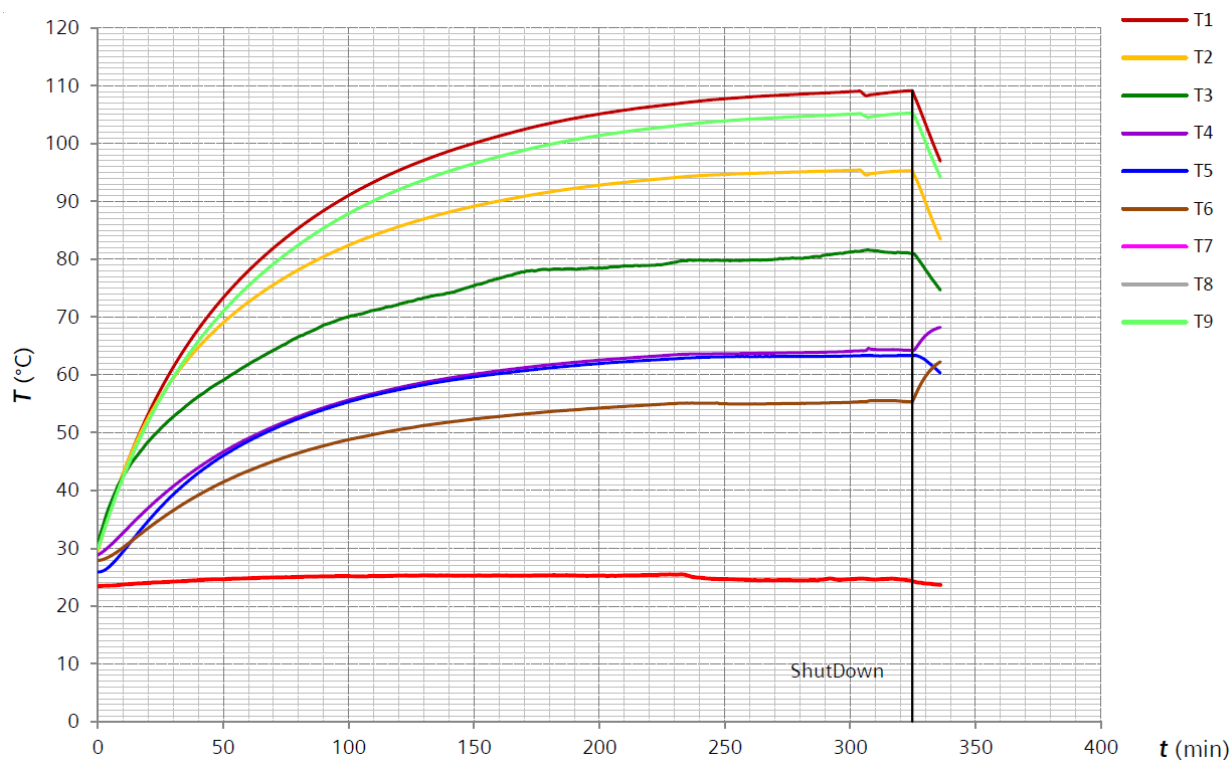
Obrázek 5-5 Průběh oteplení referenčního motoru

T1 zde znázorňuje oteplení DE konce vinutí, T2 oteplení konce vinutí na NDE straně, T3 oteplení ložisek na DE straně, T4 oteplení ložisek na NDE straně, T5 oteplení rotoru, T6 teplení těsnícího pouzdra svorkovnice, T7 oteplení svorkovnice, T8 konec vinutí na DE straně



Obrázek 5-6 Průběh oteplení motoru s radiální nesymetrií

Z grafu pozorujeme oteplení T1 konec vinutí na DE straně, T2 konec vinutí na NDE straně, T3 ložiska na DE straně, T4 kostra, T5 těsnící pouzdro svorkovnice, T6 svorkovnice, T7 konec vinutí na DE straně



Obrázek 5-7 Průběh oteplení motoru s axiální nesymetrií

V tomto grafu jednotlivé oteplení znázorňují: T1 konec vinutí na DE straně, T2 konec vinutí na NDE straně, T3 ložiska na DE straně, T4 kostra, T5 svorkovnice, T6 těsnící pouzdro, T7 vnitřní prstenec ložisek na DE straně, T8 vnitřní prstenec ložisek na NDE straně, T9 konec vinutí na DE straně

Pro větší přehlednost si některé referenční body dáme do jedné tabulky

Tabulka 5-4 Přehled oteplení referenčních bodů

	Symetrická vzduchová mezera		Radiální nesymetrie		Axiální nesymetrie	
	Oteplení (K)	Teplota při vypnutí (°C)	Oteplení (K)	Teplota při vypnutí (°C)	Oteplení (K)	Teplota při vypnutí (°C)
Konec vinutí na DE straně	85,8	108,5	84,5	109,5	84,6	109,1
Konec vinutí na NDE straně	71,5	94,2	70,8	95,8	70,7	95,3
Ložiska DE straně	59,4	82,1	57,9	82,9	56,4	81,0
Kostra	40,2	62,9	39,5	64,5	39,6	64,2
Těsnící pouzdro	30,9	53,6	30,2	55,3	30,8	55,3
Svorkovnice	45,5	68,2	37,9	62,9	38,8	63,4

Z tabulky a grafů můžeme pozorovat, že při nesymetrii dochází k menšímu oteplení součástí než při symetrické mezeře. Tento jev není patrný na konci vinutí, a to na DE ani na NDE straně, a na těsnícím pouzdru svorkovnice.

Kde naopak můžeme pozorovat menší oteplení je na svorkovnici stroje, na tento parametr nesymetrie vliv mít nemohla. Výsledek oteplení mohl být zkreslen změnou umístění termočlánku při manipulaci se štítem motoru. Na kostře motoru je pouze mírná změna oteplení, takže důkaz vlivu není příliš patrný. U měření oteplení na ložiscích DE strany je oteplení nižší, ovšem u radiální nesymetrie došlo k větší teplotě při vypnutí.

5.6 Vyhodnocení ze spekter proudu

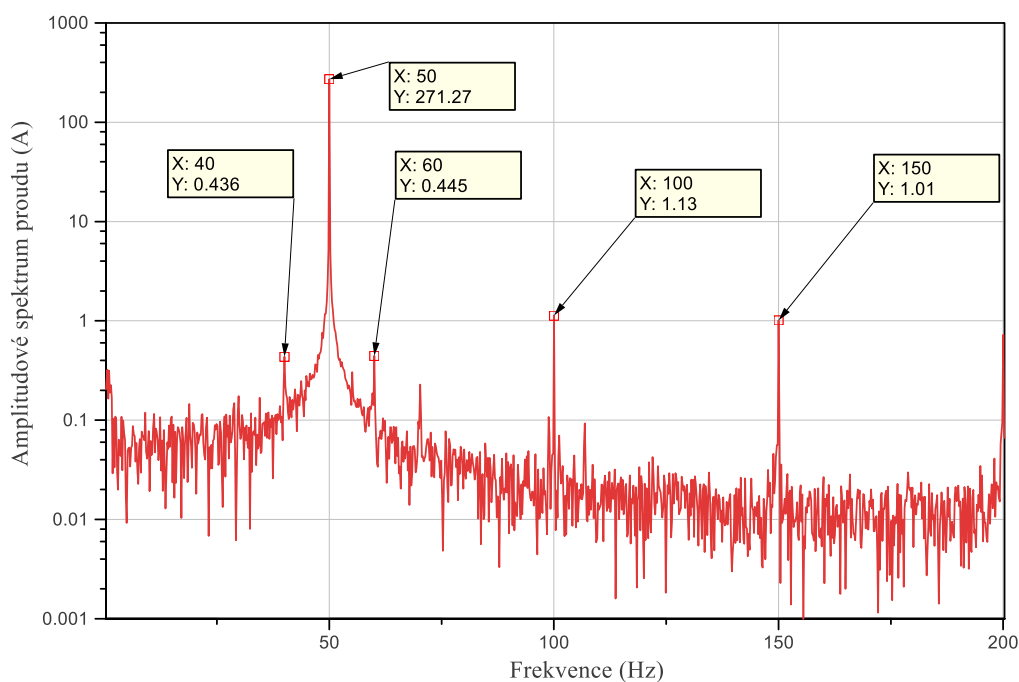
Spektra proudu pro toto vyhodnocení dostaneme z průběhu proudu naprázdno. Spektra proudu vypočítáme pomocí Rychle Fourierovy transformace (FFT)

Pomocí Rychlé Fourierovy transformace (FFT) můžeme každou funkci napsat jako součet periodických funkcí. [7]

$$x_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cdot \cos(nt) - i \sin(nt) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cdot e^{-int} dt \quad (5.6.1)$$

Díky tomuto můžeme změřený průběh proudu naprázdno přepočítat do Amplitudového spektra a pozorovat, které frekvence spektra jsou v průběhu nejvíce se vyskytující.

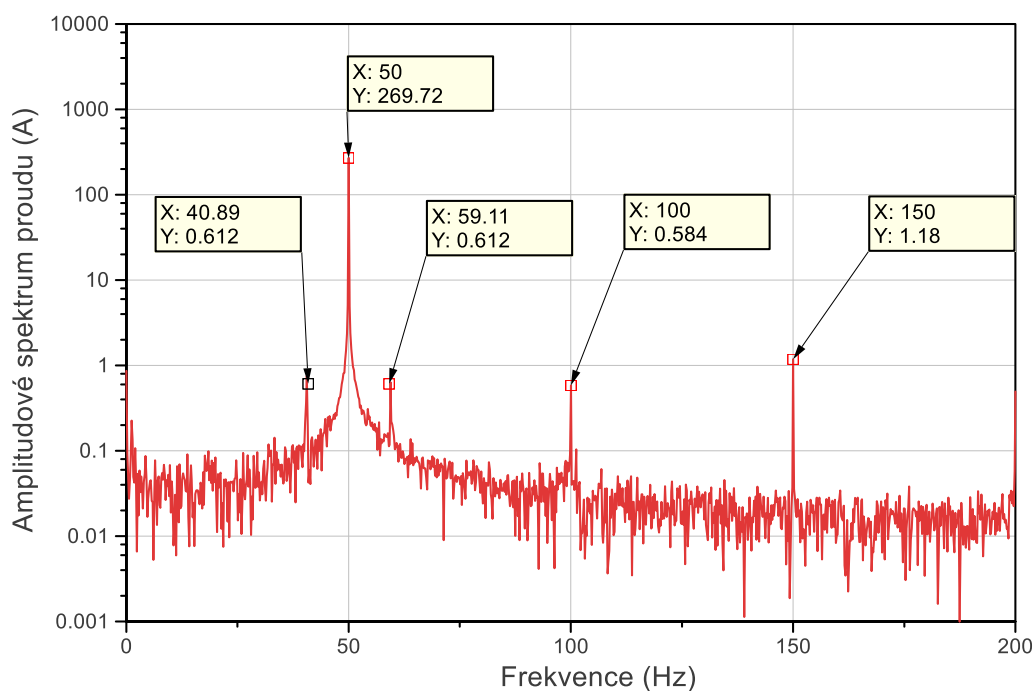
Referenční motor



Obrázek 5-8 Amplitudové spektrum proudu naprázdno referenčního motoru

Z amplitudového spektra proudu naprázdno referenčního motoru je vidět vliv lichých harmonických na jeho hodnotu. Základní harmonická složka frekvence 50 Hz obsahuje kolem sebe postranní pásma na hodnotě 40 Hz a 60 Hz. Tato postranní pásma můžou indikovat mírně nesymetrickou vzduchovou mezeru.

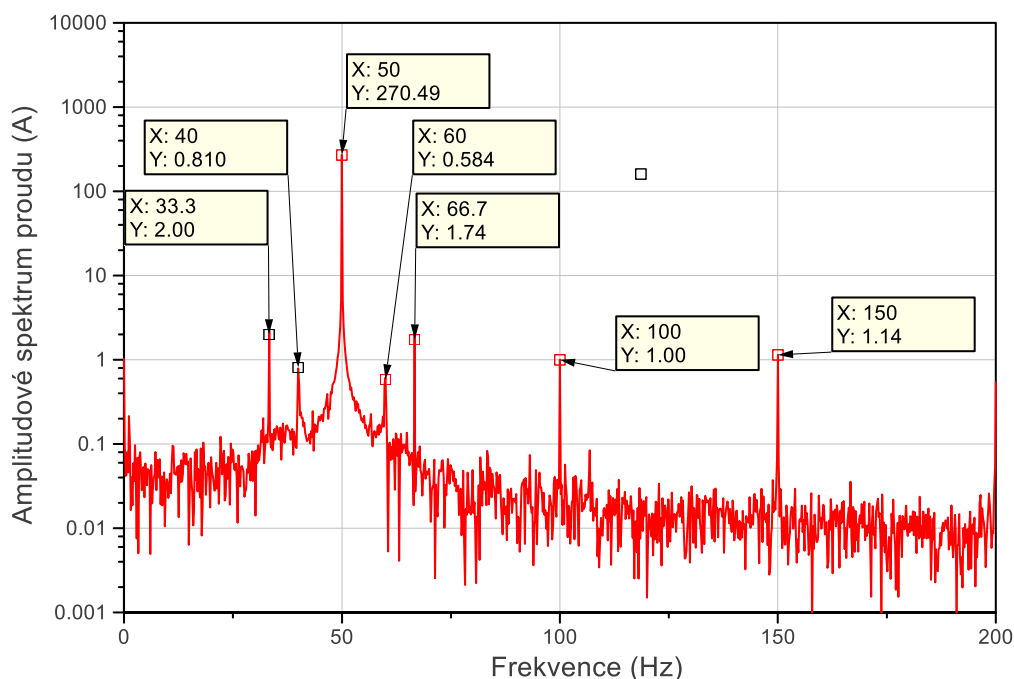
Motor s radiální nesymetrií



Obrázek 5-9 Amplitudové spektrum proudu naprázdno radiálně nesymetrického motoru

Z amplitudového spektra proudu naprázdno při měření motoru s radiální nesymetrií můžeme vidět podobná postranní pásma jako u referenčního motoru. Vlivem nesymetrické vzduchové mezery se tato pásma mírně posunula o hodnotu 0,11 Hz na obě strany spektra.

Měření s axiální nesymetrií



Obrázek 5-10 Amplitudové spektrum proudu naprázdno axiálně nesymetrického motoru.

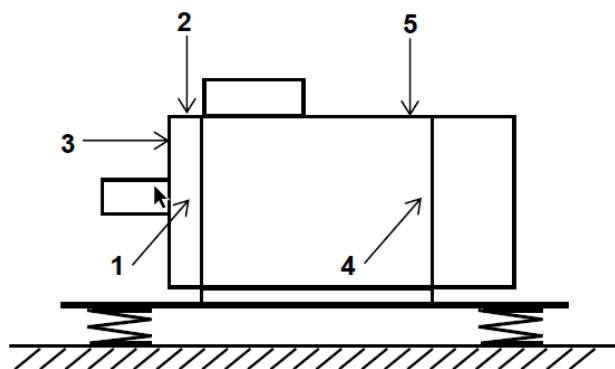
Nejvíce prokazatelný je vliv vzduchové mezery u měření axiálně nesymetrického motoru. Zde můžeme pozorovat vznik dalších postranních pásem a to na frekvenci 33,3 Hz a 66,6 Hz. O těchto postranních pásmech můžeme hovořit jako o pásmech vzniklých nesymetrickou vzduchovou mezerou.

Z celého měření spekter proudu naprázdno můžeme říct, že vliv vzduchové mezery se nejvíce prokázal až u případu s axiálně vychýleným rotorem. U radiálně nesymetrické mezery můžeme pozorovat její vliv na spektrum proudu, ovšem ten je tak malý, že se nemusí jevit jako průkazný. Lepšího zhodnocení dosáhneme u měření vibrací a jejich spekter.

5.7 Vyhodnocení vibrací

Vibrace se využívají jako nejvíce průkazný parametr pro určení nesymetrické vzduchové mezery. V našem bádání probíhá vyhodnocení výchylky vibrací, rychlosti vibrací a zrychlení vibrací. Toto vyhodnocování probíhá na 5 místech zkoumaného stroje jak při pružném, tak pevném uložení dle obrázku 8.

Vyhodnocení probíhalo pomocí vibrometru SKF -Microlog CMXA-48, kdy se stroj pomocí měniče frekvence rozběhl z nulových otáček až po otáčky 4300 min^{-1} , tedy přibližně na hodnotu 1,5 násobku synchronních otáček. Výchylka a rychlost vibrací byla přímo posouzena ze změřených průběhů. Z hodnot zrychlení vibrací byla pomocí Rychlé Fourierovy transformace (FFT) vypočtena amplitudová spektra



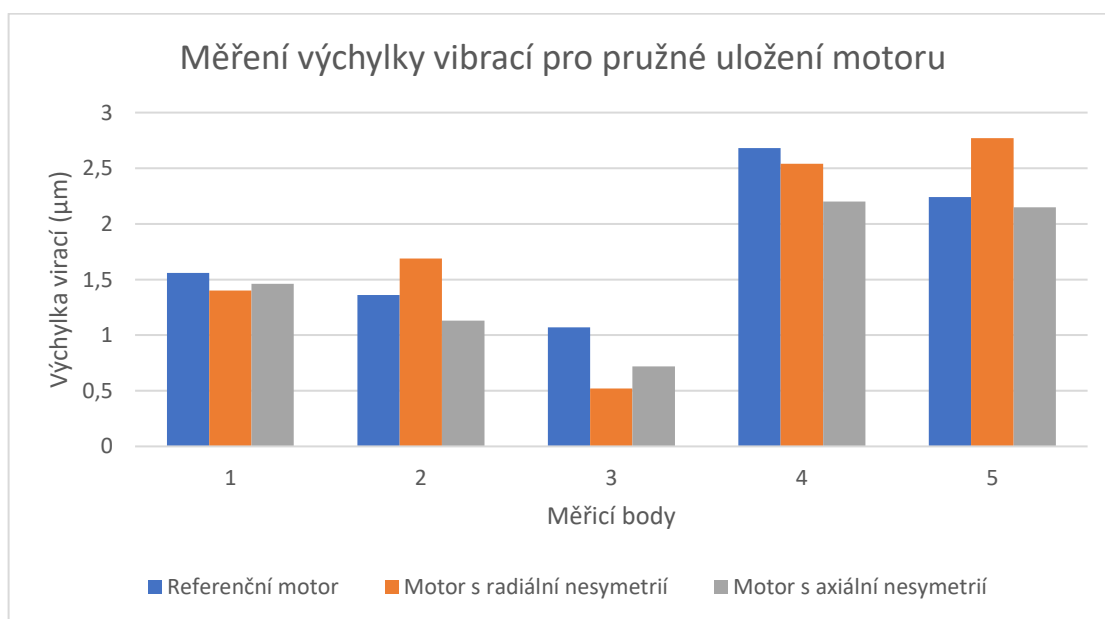
Obrázek 5-11 Schéma vyhodnocení vibrací

5.7.1 Měření odchylky a rychlosti u vibrací

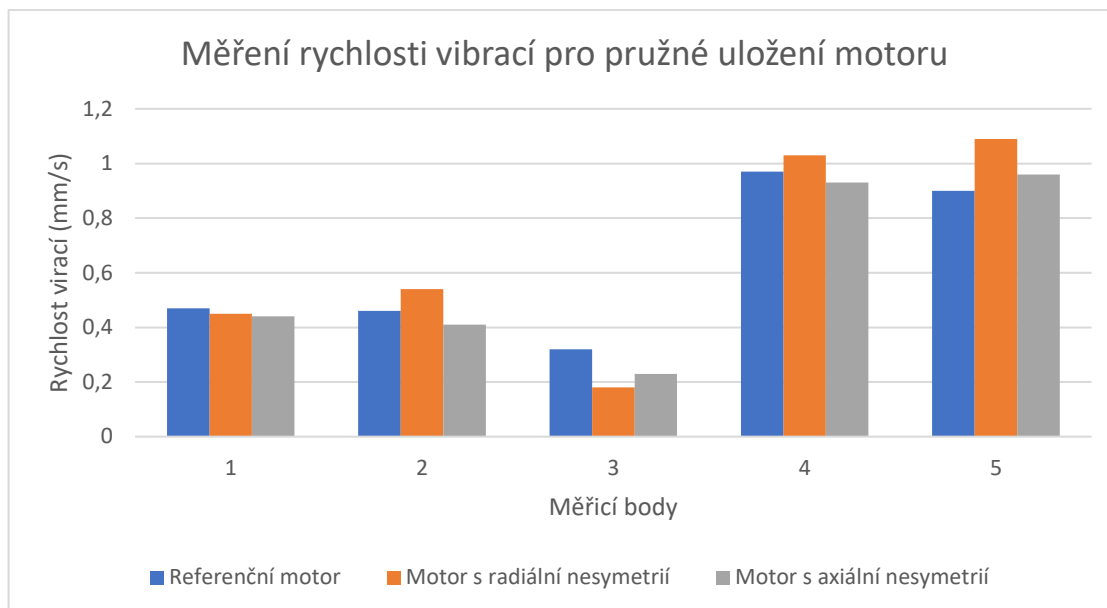
Při prvním pohledu na vibrace motoru se podíváme na odchylku motoru a rychlost vibrací

Tabulka 5-5 Změřené hodnoty odchylky vibrací a rychlosti vibrací pro pružné uložení

Měřené místo	Referenční motor		Motor s radiální nesymetrií		Motor s axiální nesymetrií	
	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)
1	1,56	0,47	1,4	0,45	1,46	0,44
2	1,36	0,46	1,69	0,54	1,13	0,41
3	1,07	0,32	0,52	0,18	0,72	0,23
4	2,68	0,97	2,54	1,03	2,20	0,93
5	2,24	0,90	2,77	1,09	2,15	0,96
Norm.	45	2,80	45	2,8	45	2,80



Obrázek 5-12 Sloupkový graf změřených výchylek vibrací pro pevné uložení stroje při chodu naprázdno

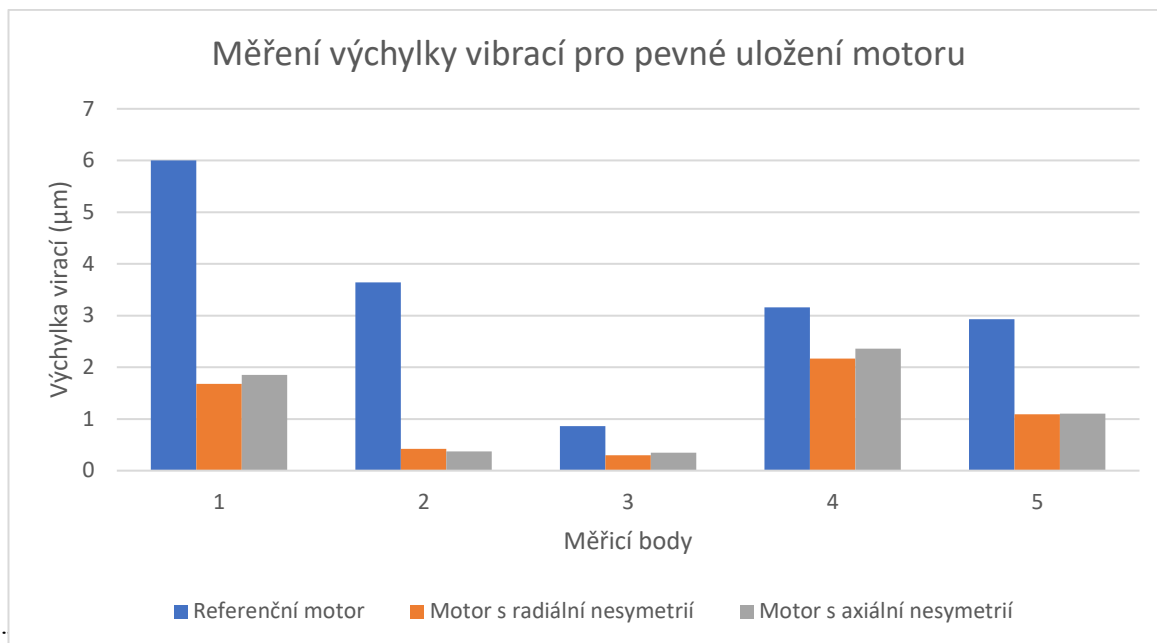


Obrázek 5-13 Sloupcový graf změřené rychlosti vibrací pro pevné uložení stroje při chodu naprázdno

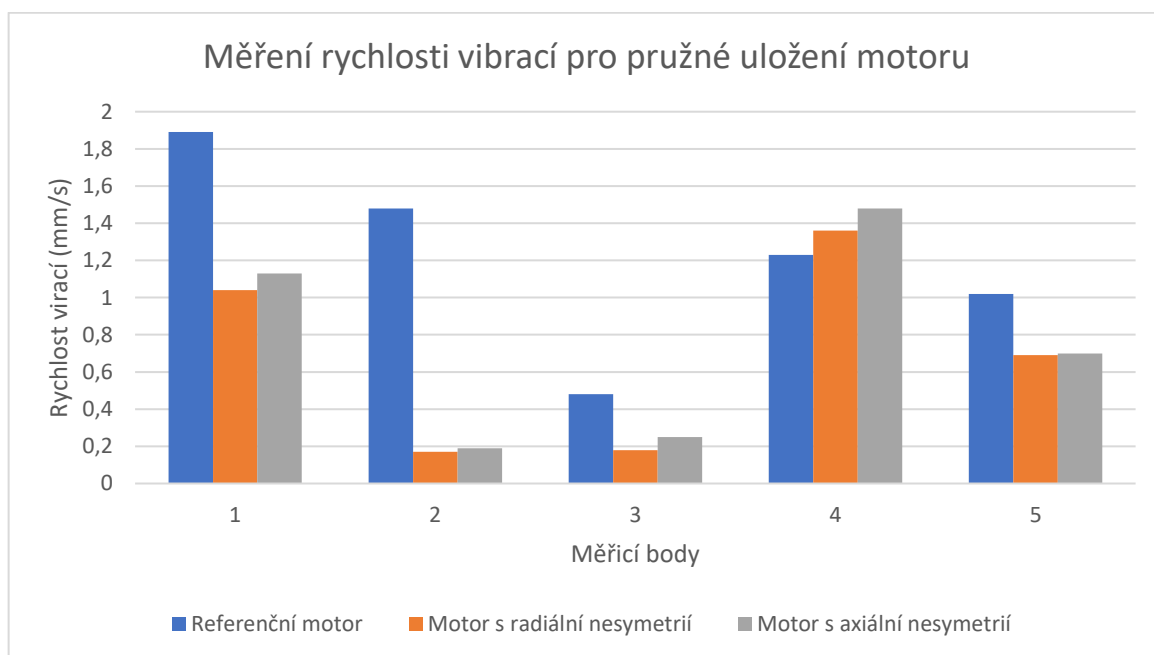
U měření při pružném uložení motoru není jak u měření odchylky vibrací, tak u jejich rychlosti příliš patrný vliv nesymetrické vzduchové mezery. V měřeném bodě 5 je nejvyšší výchylka vibrací 2,77 μm u radiálně nesymetrické vzduchové mezery. Toto se promítlo i do měření rychlosti vibrací, kde se v 5. měřeném bodě vliv nesymetrie ověřit dá. Je pozorovatelný nárůst rychlosti vibrací jak u opět radiálně nesymetrické vzduchové mezery, tak u axiálně nesymetrického uložení rotoru.

Tabulka 5-6 Změřené hodnoty odchylky vibrací a rychlosti vibrací pro pružné uložení

Měřené místo	Referenční motor		Motor s radiální nesymetrií		Motor s axiální nesymetrií	
	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)	Výchylka (μm)	Rychlost (mm/s)
1	6	1,89	1,68	1,04	1,85	1,13
2	3,64	1,48	0,42	0,17	0,37	0,19
3	0,86	0,48	0,3	0,18	0,35	0,25
4	3,16	1,23	2,17	1,36	2,36	1,48
5	2,93	1,02	1,09	0,69	1,1	0,7
Norm.	29	2,8	29	2,8	29	2,8



Obrázek 5-14 Sloupcový graf změřených hodnotek výchylky vibrací pro pevné uložení motoru pro chod při jmenovitém zatížení



Obrázek 5-15 Sloupcový graf změřených rychlostí vibrací pro pružné uložení pro chod při jmenovitém zatížení stroje

U pevného uložení motoru pozorujeme ve většině bodů výrazné zmenšení hodnot oproti referenčnímu motoru. Vliv nesymetrie se u pružného uložení projeví u měřeného bodu č. 4. Zde je patrný nárůst rychlosti vibrací u obou nesymetrických měření.

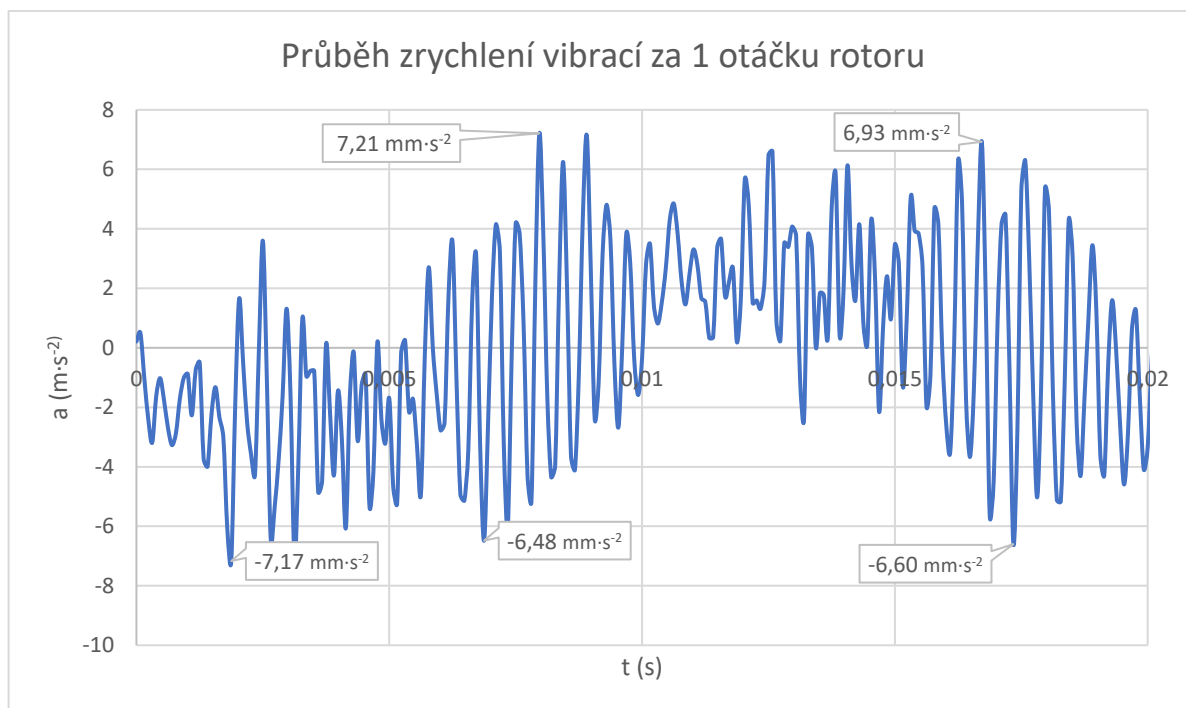
5.7.2 Vyhodnocení zrychlení u vibrací

Časový průběh zrychlení vibrací motoru

Při vyhodnocení časového průběhu zrychlení vibrací vyjdeme z otáčkové frekvence stroje, kterou vypočteme z otáček naprázdno

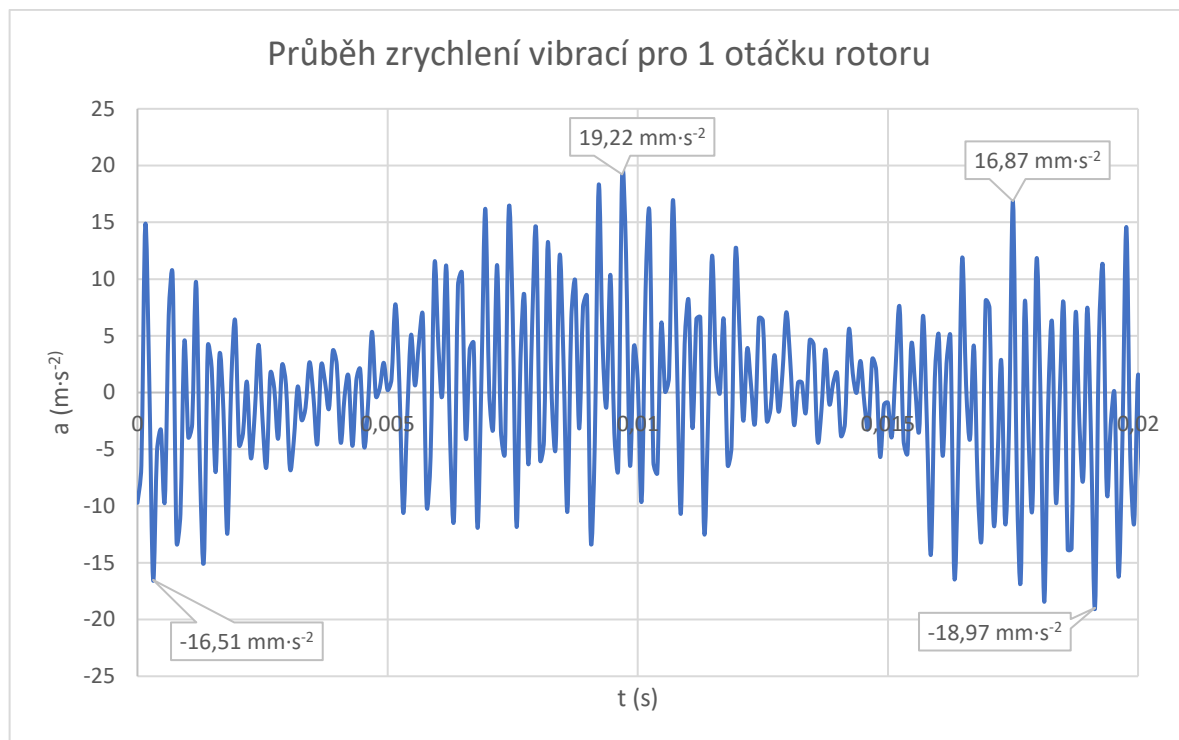
$$f = \frac{n}{60} = \frac{2986}{60} = 49,8 \text{ Hz} \quad (5.7.1)$$

Pro tuto otáčkovou frekvenci vychází perioda otáčky rotoru 20 ms. Pro tuto periodu budeme vyhodnocovat časový průběh zrychlení vibrací



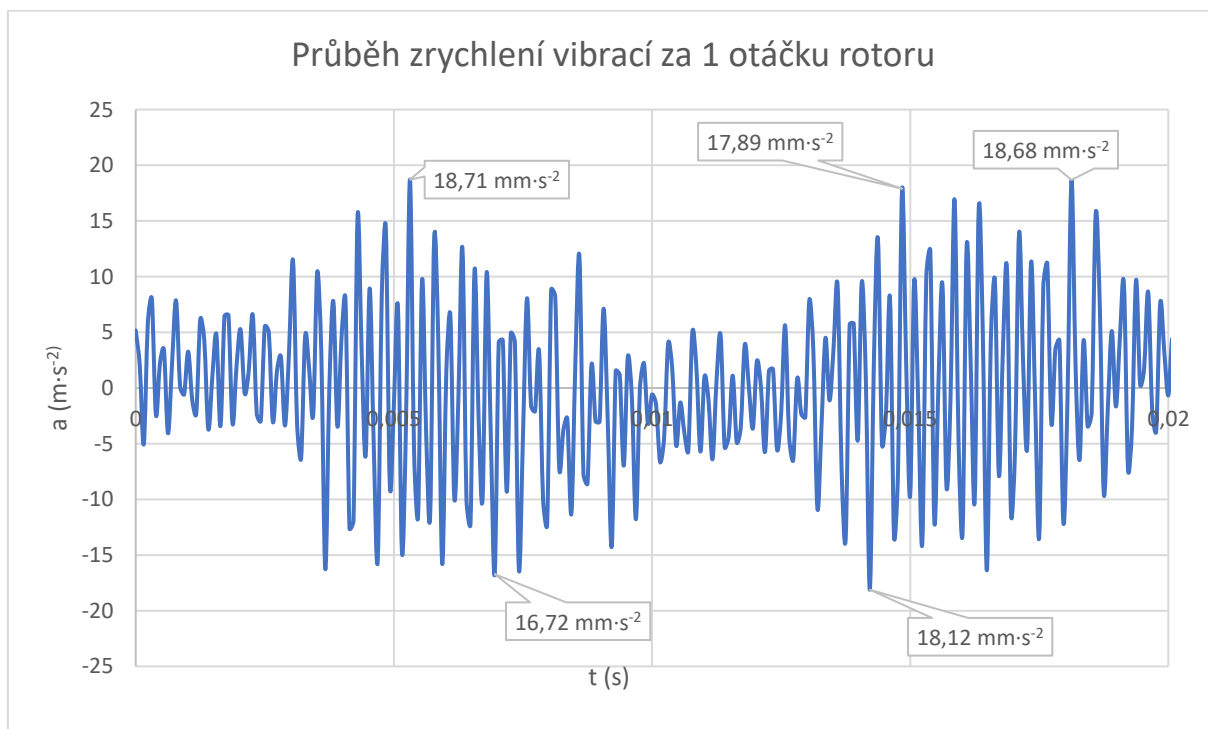
Obrázek 5-16 Průběh vibrací referenčního motoru

Ze změřeného průběhu zrychlení u vibrací referenčního motoru můžeme sledovat, že maximální amplituda zrychlení vibrací dosahuje hodnoty $7,21 \text{ mm/s}^2$.



Obrázek 5-17 Průběh zrychlení vibrací motoru po dobu 2 otáček rotoru

Při radiální nesymetrii dochází k daleko větším amplitudám zrychlení vibrací, kde se jeho maximální hodnota rovná hodnotě $19,22 \text{ mm/s}^2$, což je skoro třikrát více než u referenčního motoru. Dále můžeme pozorovat, že maximální hodnoty dosahuje dvakrát za jednu otáčku rotoru, u referenčního motoru, který nesymetrii neobsahuje dochází k maximu pouze jednou za otáčku.



Obrázek 5-18 Průběh zrychlení vibrací pro motor s axiální nesymetrií pro dobu 2 otáček rotoru

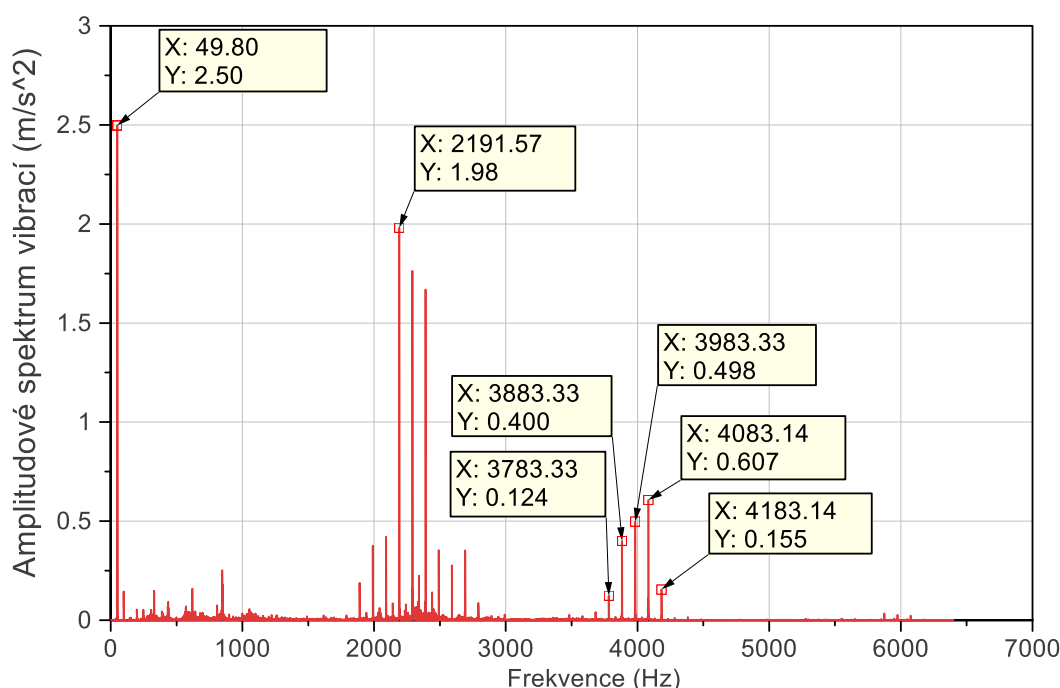
U motoru s axiální nesymetrií, jak můžeme vidět v časovém průběhu jeho zrychlení vibrací, dochází k maximální amplitudě dvakrát za jednu otáčku motoru. Můžeme tedy konstatovat, že nesymetrie vzduchové mezery má na četnost odchylek zrychlení vibrací velký vliv.

FFT analýza průběhu zrychlení vibrací

Lepšího pohledu na vliv nesymetrie na vibrace dosáhneme při výpočtu jejich amplitudových spekter. Toho dosáhneme pomocí FFT analýzy. Pro tuto analýzu jsme si zvolili měřicí bod č. 1 v horizontálním směru na DE straně rotoru, který se nám pro analýzu jevil jako nejvhodnější.

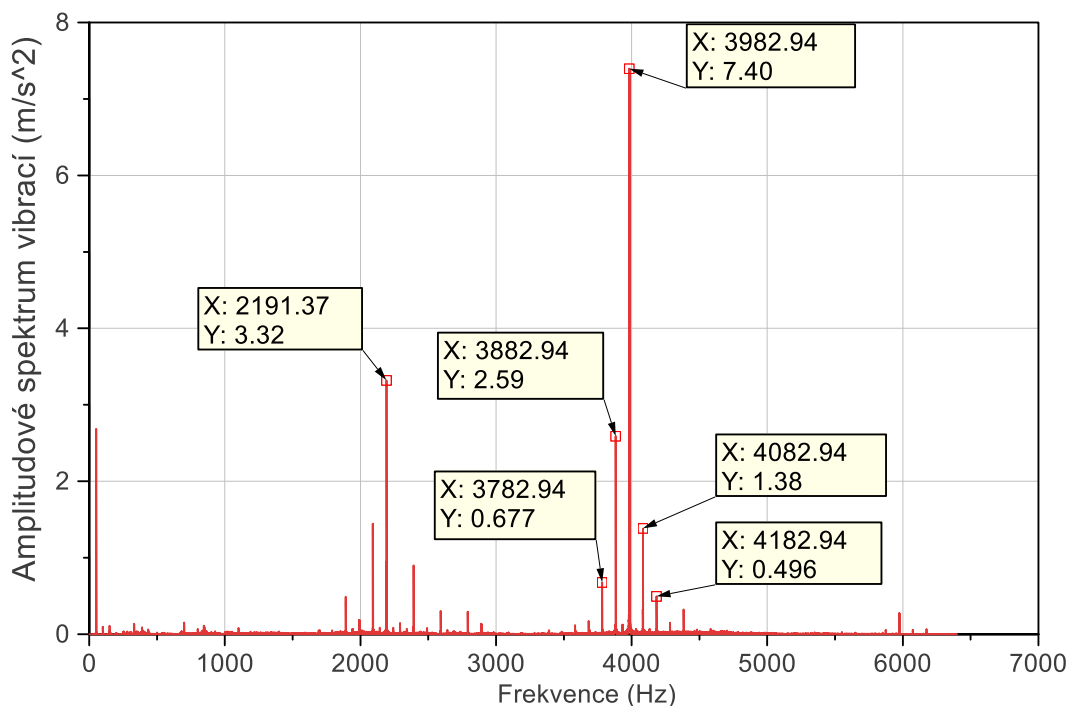
Významnou frekvencí můžeme vypočítat pomocí počtu satorových tyčí, kterých je 40. Předpokládaná frekvence, kde se projeví nesymetrie vychází se vztahu

$$f = P \cdot f_R = 40 \cdot \frac{2986}{60} = 1991,6 \text{ Hz} \quad (5.7.1)$$



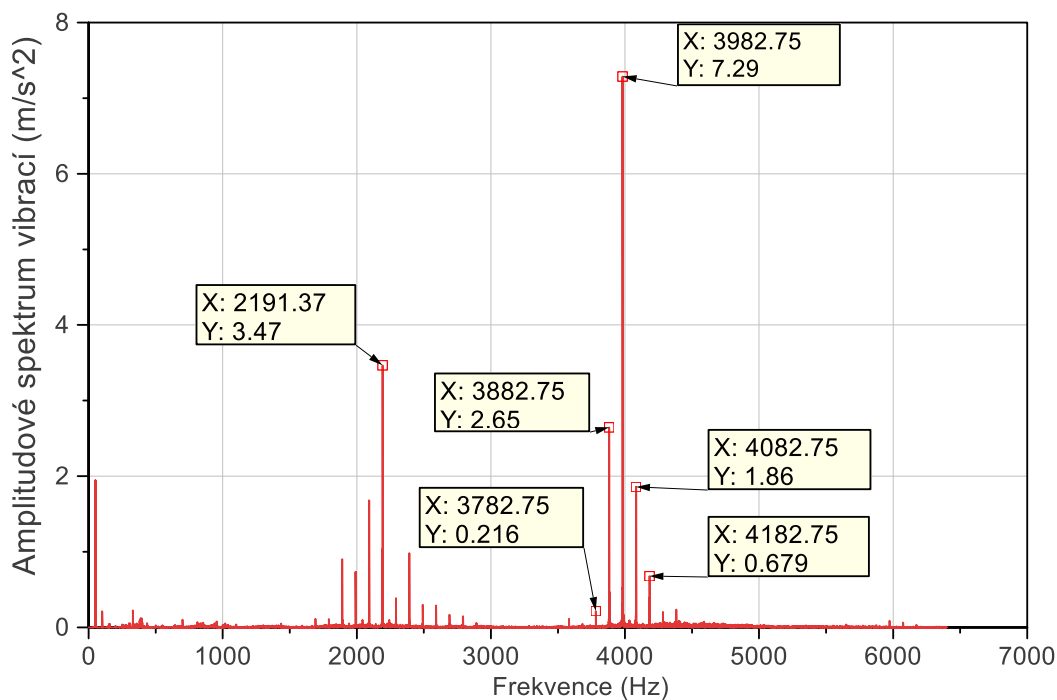
Obrázek 5-19 Amplitudové spektrum zrychlení vibrací referenčního motoru

Na obrázku 5 – 19 vidíme amplitudové spektrum referenčního motoru, které bude sloužit jako etalon pro porovnání s dalšími spektry. V tomto spektru je patrná viditelná 1. harmonická složka na frekvenci 49,8 odpovídající otáčkové frekvenci stroje. Kolem frekvence 2250 Hz se objevila postranní pásma způsobena frekvenčním měničem, kterým byl motor řízen. Na dvojnásobku předpokládané frekvence, tedy 3983,3 Hz můžeme vidět malá postranní pásma, která jsme předpokládali jako způsobena nesymetrickou vzduchovou mezerou. Tato pásma jsou proti základní otáčkové frekvenci zanedbatelná, ovšem můžou indikovat mírnou nesymetrii.



Obrázek 5-20 Amplitudové spektrum zrychlení vibrací motoru s radiální nesymetrií

Obrázek 5 – 20 nám zobrazuje amplitudové spektrum zrychlení vibrací motoru s radiálně nesymetrickou vzduchovou mezerou. Postranní pásma natransponovaná řízením frekvenčním měničem jsou zde větší, neboť jsou kolem námi teoreticky vypočtené frekvence pro vyhodnocení vibrací. To je patrné z postranních pásem na jejím dvojnásobku. Tato pásma dosahují až desetinásobku hodnoty u referenčního motoru, jsou tedy přímým ukazatelem nesymetrické vzduchové mezery.



Obrázek 5-21 Amplitudové spektrum zrychlení vibrací motoru s axiální nesymetrií

U spekter zrychlení vibrací pro motor s axiální nesymetrií je pozorovatelný stejný jev jako u spekter s radiálně nesymetrickou mezerou. Jevem jiným než u předešlého spektra je menší vliv základní harmonické složky. Toto nám indikuje větší vliv nesymetrie než u předešlého měřeného případu.

5.8 Měření hluku

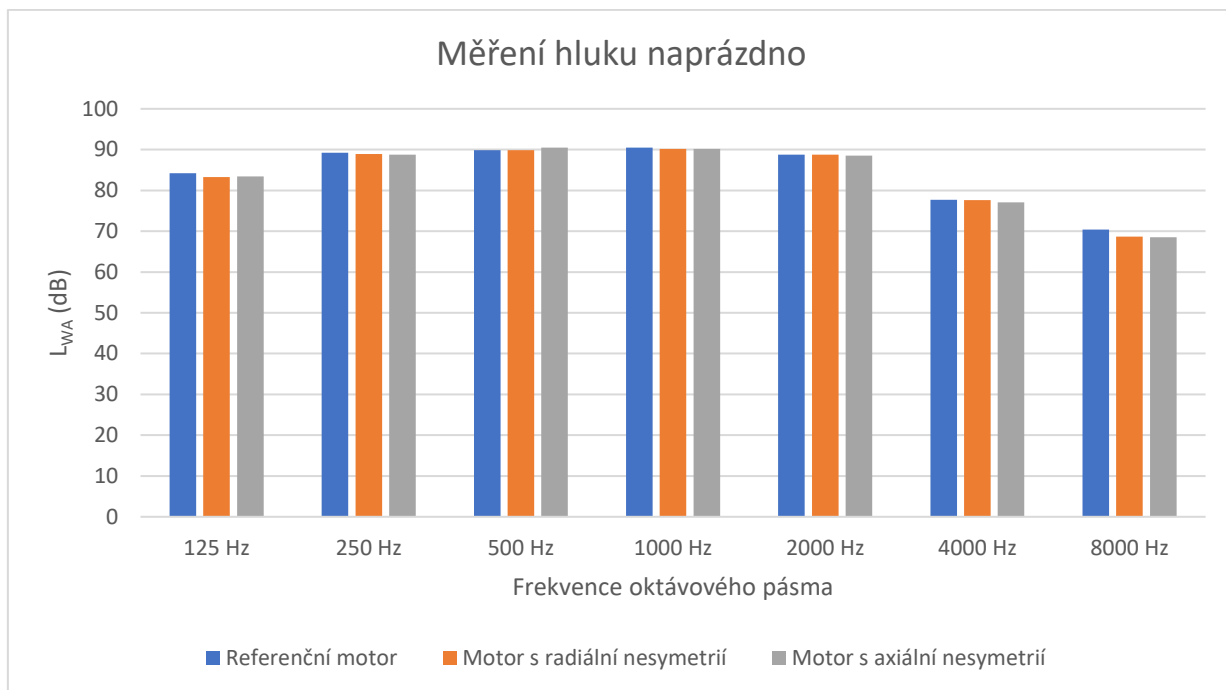
Pomocí 5 mikrofónů B&K – 4942 rozestavěných kolem stroje se změřila průměrná hladina akustického tlaku L_{pfa} korigovaná na pozadí a prostředí. Z této hodnoty se poté výpočtem určila hodnota akustického výkonu vážená filtrem A pomocí rovnice

$$L_{WA} = L_{pfa} + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (5.8.1)$$

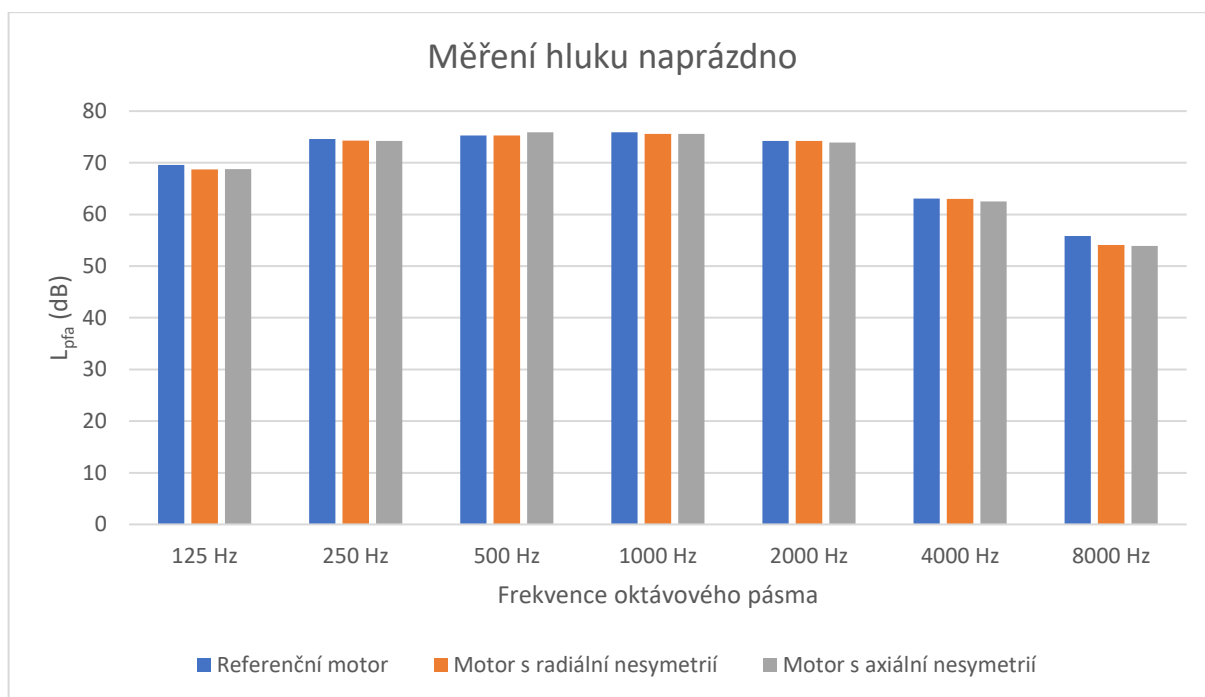
Kde S je plošný obsah měřicí plochy vymezeným rozestavěnými mikrofony a S_0 je plocha 1 m^2

Tabulka 5-7 Změřené hodnoty akustického tlaku při chodu naprázdno motorů

	Referenční motor	Motor s radiální nesymetrií	Motor s axiální nesymetrií	Referenční motor	Motor s radiální nesymetrií	Motor s axiální nesymetrií
Frekvence oktávového pásma (Hz)	L_{WA} (dB)	L_{WA} (dB)	L_{WA} (dB)	L_{pfa} (dB)	L_{pfa} (dB)	L_{pfa} (dB)
125 Hz	84,2	83,3	83,4	69,6	68,7	68,8
250 Hz	89,2	88,9	88,8	74,6	74,3	74,2
500 Hz	89,9	89,9	90,5	75,3	75,3	75,9
1000 Hz	90,5	90,2	90,2	75,9	75,6	75,6
2000 Hz	88,8	88,8	88,5	74,2	74,2	73,9
4000 Hz	77,7	77,6	77,1	63,1	63	62,5
8000 Hz	70,4	68,7	68,5	55,8	54,1	53,9



Obrázek 5-22 Změřené hodnoty L_{WA} při chodu naprázdno

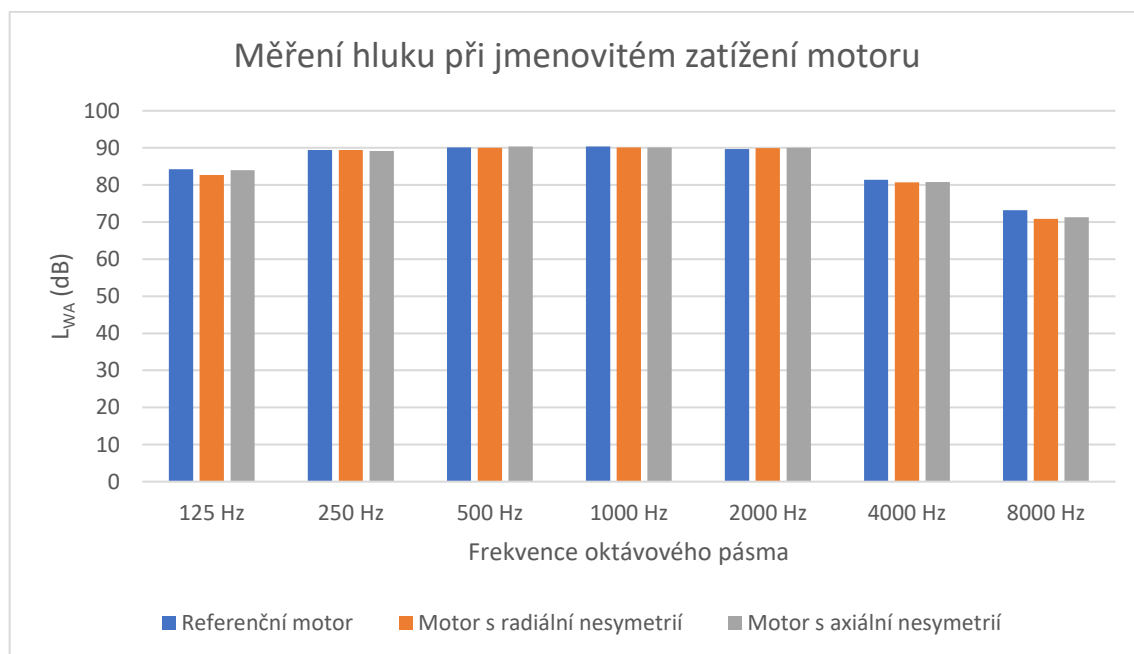


Obrázek 5-23 Změřené hodnoty L_{pfa} při chodu naprázdno

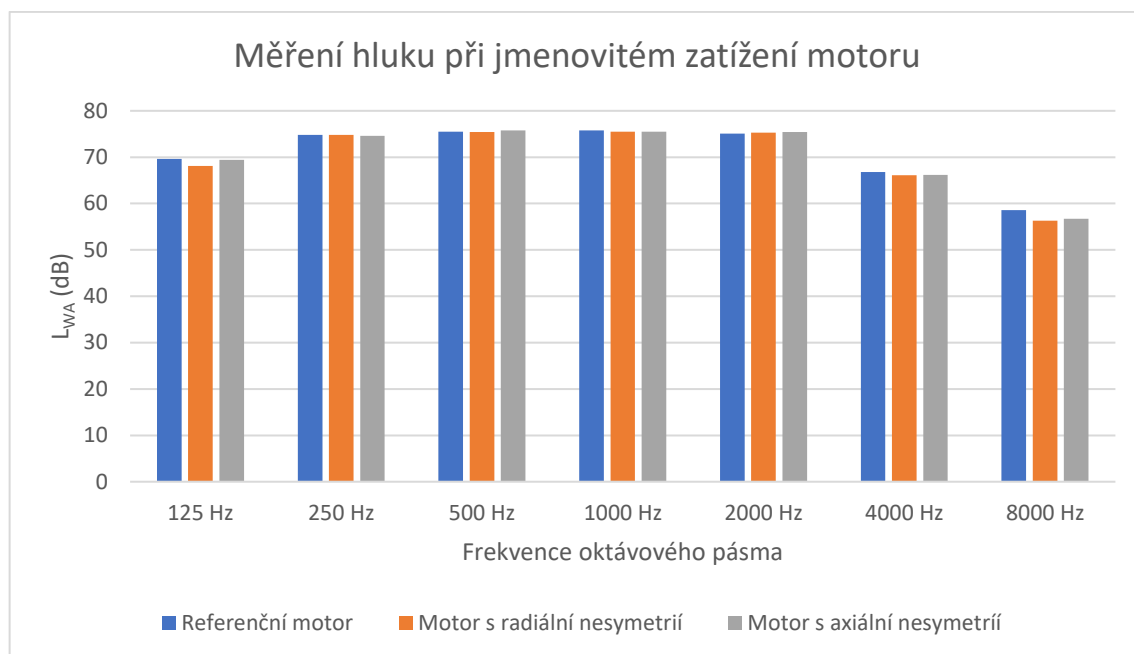
Z tabulky a lépe ze sloupcových grafů můžeme pozorovat, že nesymetrie vzduchové mezery hladinu akustického tlaku ani výkonu v měřených oktařových pásmech neovlivnila.

Tabulka 5-8 Tabulka změřených hodnot akustického tlaku

	Referenční motor	Motor s radiální nesymetrií	Motor s axiální nesymetrií	Referenční motor	Motor s radiální nesymetrií	Motor s axiální nesymetrií
Frekvence oktávového pásma (Hz)	L_{WA} (dB)	L_{WA} (dB)	L_{WA} (dB)	L_{pfa} (dB)	L_{pfa} (dB)	L_{pfa} (dB)
125 Hz	84,2	82,7	84	69,6	68,1	69,4
250 Hz	89,4	89,4	89,2	74,8	74,8	74,6
500 Hz	90,1	90	90,4	75,5	75,4	75,8
1000 Hz	90,4	90,1	90,1	75,8	75,5	75,5
2000 Hz	89,7	89,9	90	75,1	75,3	75,4
4000 Hz	81,4	80,7	80,8	66,8	66,1	66,2
8000 Hz	73,2	70,9	71,3	58,6	56,3	56,7



Obrázek 5-24 Změřené hodnoty L_{WA} při jmenovitém zatížení stroje



Obrázek 5-25 Změřené hodnoty L_{pfa} při jmenovitém zatížení stroje

Při měření hluku při jmenovitém zatížení stroje pozorujeme u oktařového pásma 2000 Hz mírný nárůst hladiny akustického tlaku proti referenčnímu motoru jak u motoru s radiální nesymetrií vzduchové mezery, tak u motoru s axiální nesymetrií vzduchové mezery. V tomto pásmu tedy můžeme hovořit o vlivu nesymetrické vzduchové mezery.

6 Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo měřením zjistit vliv nesymetrie vzduchové mezery na parametry asynchronního motoru. Měření bylo vyhodnoceno pro 2 různé typy nesymetrie – radiální, kdy se nesymetrie provedla vychýlením rotoru na jedné straně motoru a axiální, kde došlo k vychýlení rotoru na obou stranách, a tak byl vychýlen po axiální ose motoru.

Na motoru byla provedena typová zkouška, máme tedy kompletní přehled o všech parametrech motoru, dále se vyhodnotila proudová spektra motoru a spektra vibrací společně s jejich průběhem v čase.

Ze zatěžovacích charakteristik a měření naprázdno není pozorovaný žádný vliv. U měření nakrátko je patrný vliv nesymetrické vzduchové mezery na moment nakrátko, ten u motoru s axiálně nesymetrickou vzduchovou mezerou značně klesl. Ze změřených parametrů lze pozorovat vliv nesymetrie na záběrný proud, kde u obou měření s nesymetrickou vzduchovou mezerou můžeme pozorovat jeho pokles.

Dalším zkoumaným parametrem bylo oteplení motoru. Měření probíhalo na 6 místech. Z tohoto měření byl pozorovatelný vliv nesymetrie na konci vinutí na NDE straně a ložiscích na DE straně. Zde můžeme pozorovat zmenšení celkového oteplení proti referenčnímu motoru jak u motoru s radiální, tak u motoru s axiální nesymetrií.

Potom se postupovalo analýzou proudových spekter proudu naprázdno. V těchto amplitudových spektrech můžeme pozorovat vliv lichých harmonických složek. U motorů s nesymetrickou mezerou je viditelný vznik postranních pásem kolem základní frekvence 50 Hz. Nejvíce pozorovatelné je to u motoru s axiální nesymetrií, tedy horšího provedení uložení motoru.

Z hodnot rychlosti u vibrací a měření odchylky jsme nic vypovídajícího nedostali. Toto je pravděpodobně způsobeno měření pouze ve frekvenčním spektru 1 kHz. Lepší představu nám nabídlo měření vibrací pomocí zrychlení. Z průběhu toho zrychlení na měřicím bodě 1 v horizontálním směru na DE straně rotoru motoru vidíme, že nesymetrie vzduchové mezery má vliv na četnost period zrychlení během jedné otáčky, lépe je to viditelné ve spektru vibrací. Ve spektru referenčního motoru vidíme dominantní první harmonickou složku. Dále je v tomto spektru viditelný vliv frekvenčního měniče, ze kterého byl motor napájen. To se projevuje ve vzniku postranních pásem kolem frekvence 2191 Hz. Ve spektrech u motoru s radiální i s axiální nesymetrií vidíme vznik nejen těchto postranních pásem, ale i na frekvenci 3982 Hz. To je dvojnásobek frekvence, kterou jsme předpokládali z teoretického rozboru problematiky. Vyhodnocení spekter vibrací se ukázalo jako nejvíce průkazný ukazatel nesymetrie vzduchové mezery.

Posledním měřeným kvalitativním parametrem byl hluk. Zde byla měřena hodnota akustického tlaku při různých frekvencích oktávového pásma. Z tohoto měření jsme nedokázali určit, zda má na tento parametr nesymetrie vliv. Ukázalo se, že hodnoty jsou v rámci chyby měření stejné.

Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, Karel, Doc. Ing. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. Ostrava, 2001. ISBN 80 – 7078 – 857 - 7.
- [2] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. 1. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1961.
- [3] MIŠÁK, Stanislav. *Diagnostika na elektrických zařízeních*. 1. Ostrava: skriptum VŠB, 2008.
- [4] SOKANSKÝ, CSC., Prof. Ing. Karel. *Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter*. Ostrava, b.r. VŠB - TU Ostrava.
- [5] NĚMEČEK, Pavel a Elias TOMEH. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [6] VAS, Peter. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*. Xviii. New York: Oxford University Press, 1993. ISBN 01-985-9375-9.
- [7] *Funkce komplexní promenné a integrální ~ transformace: Fourierovy řady I*. [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://home1.vsb.cz/~lam05/Teaching_files/Fourier1_handout.pdf